

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Vyvedení výkonu větrného parku (firma ELDACO a.s.)

The Power Output of Wind Farm (company ELDACO a.s.)

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jiří Vodný

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Vyvedení výkonu větrného parku (firma Eldaco)
The Power Output of Wind Farm (company Eldaco)

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky větrné energie
2. Větrné elektrárny a jejich provozování
3. Popis řešené lokality větrného parku
4. Návrhy variant technického řešení vyvedení výkonu
5. Výběr optimální varianty

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Rychetník V., Pavelka J., Janoušek J.: Větrné motory a elektrárny, ČVUT, Praha, 1997
2. Cetkovský S., Frantál B., Štekl J.: Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí, AVČR, Brno, 2010
3. Další literatura podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

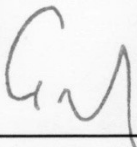
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

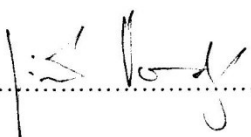



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 27. 4. 2013



.....

Bc. Jiří Vodný

Prohlášení:

„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26 odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB – TU Ostrava.“

V Ostravě dne 10. 4. 2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Šíkula', is written above a horizontal dotted line.

Ing. Miloš Šíkula

Poděkování:

Chtěl bych na tomto místě poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Krejčímu, Ph.D. a odborným konzultantům Ing. Jiřímu Markovi a Ing. Markovi Tinkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při vypracovávání této diplomové práce.

Zároveň bych rád poděkoval oponentovi Ing. Miloši Šikulovi za poskytnutí údajů k vypracování teoretické i praktické části práce.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem variant technického řešení vyvedení výkonu větrného parku. V teoretické části je rozebírána problematika volby vhodné lokality pro větrnou elektrárnu na základě měření povětrnostních podmínek a dopadů na životní prostředí nebo blízké obyvatelstvo. Teoretická část je dále doplněna rozbohem jednotlivých typů větrných elektráren u nás používaných a podmínkami připojování a provozování větrných elektráren v distribuční síti.

V praktické části je popsána řešená lokalita větrného parku. Jsou zde uvedeny katastry jednotlivých obcí s umístěním elektráren i oblast rozvodny Boskovice, do které bude výkon elektráren vyveden. Následně jsou řešeny dvě varianty vyvedení výkonu větrného parku a to spojení elektráren do paprskové nebo okružní sítě. Pro oba tyto návrhy jsou dále projektována kabelová vedení. V závěru praktické části jsou obě tyto varianty zhodnoceny.

Klíčová slova:

Větrný park; vyvedení výkonu; paprsková síť; okružní síť; kabelové vedení; dimenzování vodiče; tepelné účinky zkratového proudu; úbytek napětí; ztráty.

Abstract:

This diploma work deal with proposal variants technical solving the power output windy farm. In the theoretic part is construed the problem of choice of fit locations for windy power station on the metering basis of weather conditions and impacts on environment or near living population. The Theoretic part is further completed with the analysis single types of windy used power stations in our territory and with the conditions of connecting and prosecution of windy power stations in distribution grid.

In ttthe practical part is described the solved lokality of windy park. There are the mentioned land registers of particular villages with power stations placing and also the area of Boskovice distribution point here, which will be the power stations capacity output to. There are subsequently solved two variants of power output of windy park and it means the connection of power stations to the radial or circular system. For both of these projects are further projected cable leads. In the conclusion of practical part are both of these variants estimated

Key Words:

Wind farm; power output; radial system; circular system; underground line; dimensioning conductor; thermal effects short – circuit current; voltage drop; power losses.

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol	Název	Jednotka
A	plocha	[m ²]
ČSN	česká státní norma	
DS	distribuční soustava	
ΔE_k	změna kinetické energie	[J]
E_v	energie větru	[J]
F_a	axiální síla	[N]
HDO	hromadné dálkové ovládání	
$I_{\check{c}}$	činný proud	[A]
I_j	jalový proud	[A]
I_{ke}	ekvivalentní oteplovací proud	[kA]
I''_{k3}	počáteční rázový zkratový proud	[kA]
$I_{vpř}$	harmonický proud	[A]
$I_{v\ zul}$	přípustný harmonický proud výrobního zařízení	[A]
K	koeficient pro dimenzování vedení	
NN	nízké napětí	[V]
OZE	obnovitelné zdroje energie	
ΔP	změna činného výkonu	[W]
PDS	provozovatel distribuční soustavy	
P_p	maximální zatížení	[W]
PPDS	pravidla provozování distribuční sítě	
P_{lt}	flikr	
P_k	jmenovitý ztráty nakrátko	[W]
PNE	podniková norma energetiky	
P_v	výkon větru	[W]
S	průřez	[mm ²]
S_A	přípojný výkon výrobního zařízení	[VA]
S_{KV}	zkratový výkon v přípojném bodě	[VA]
S_{nG}	jmenovitý zdánlivý výkon generátoru	[VA]
S_{nT}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	[VA]
S_0	referenční výkon	[VA]
SPG	převodovka s variátorem	
U_n	jmenovité sdružené napětí v místě zkratu	[V]

U_{nG}	jmenovité napětí generátoru	[V]
U_{nT}	jmenovité napětí transformátoru	[V]
U_s	sdružené napětí	[V]
V	objem vzduchu	[m ³]
V_N	vysoké napětí	[V]
VVN	velmi vysoké napětí	[V]
T	transformátor	
X_k	induktivní reaktance	[$\Omega \cdot km^{-1}$]
Z	impedance	[Ω]
c_{max}	napěťový součinitel	
$\cos \varphi$	účinník	
f	frekvence	[Hz]
l	délka vedení	[m]
k_e	součinitel - výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu[-]	
k_{k1}	zkratový poměr výkonů	
m	hmotnost vzduchu	[kg]
s	dráha	[m]
Δu_{DOV}	dovolený úbytek napětí	[V]
u_k	jmenovité napětí nakrátko	[%]
Δu_{maxvn}	maximální změna napětí	[V]
$\Delta u_{vn,110}$	změna napětí	[V]
v	rychlost větru	[m.s ⁻¹]
x_d''	rázová reaktance generátoru	[%]
η	účinnost	[%]
ρ	hustota vzduchu	[kg/m ³]
ρ	měrný elektrický odpor	[$\Omega mm^2 m^{-1}$]

Obsah

1. Úvod	- 1 -
2. Úvod do problematiky větrné energie	- 2 -
2.1 Historický vývoj	- 2 -
2.2 Volba lokality	- 3 -
2.2.1 Větrné poměry v dané lokalitě	- 3 -
2.3 Měření větru	- 5 -
2.3.1 Metoda měření v bodě	- 5 -
2.3.2 Distanční metoda měření	- 7 -
2.3.3 Meteorologický stožár	- 7 -
2.4 Dopady větrných elektráren	- 8 -
2.4.1 Životní prostředí	- 8 -
2.4.2 Obyvatelstvo	- 8 -
3. Větrné elektrárny a jejich provozování	- 11 -
3.1 Energie a výkon větru	- 11 -
3.2 Větrné motory	- 12 -
3.2.1 Větrné motory odporové	- 12 -
3.2.2 Větrné motory vztakové	- 13 -
3.2.3 Aerodynamika vztakového větrného motoru	- 14 -
3.2.4 Princip funkce vztakových motorů	- 15 -
3.3 Elektrická zařízení větrných elektráren	- 17 -
3.3.1 Systém s asynchronním generátorem	- 17 -
3.3.2 Systém se synchronním generátorem	- 18 -
3.3.3 Systém se synchronním generátorem a variátorem	- 20 -
3.4 Připojení a provozování VtE v soustavě vn a 110kV	- 21 -
3.4.1 Podmínky pro připojení	- 21 -
3.4.2 Chování výroben v síti	- 23 -
3.4.3 Zpětné vlivy na napájecí síť	- 24 -
4. Popis řešené lokality větrného parku	- 28 -
4.1 Oblast elektráren	- 28 -
4.2 Oblast rozvodny Boskovice	- 32 -
4.3 Kabel	- 35 -
5. Návrh variant technického řešení vyvedení výkonu	- 37 -
5.1 Projektování kabelového vedení	- 37 -

5.1.1 Proudové zatížení vodiče	- 37 -
5.1.2 Úbytek napětí na vedení	- 37 -
5.1.3 Tepelné účinky zkratových proudů	- 38 -
5.2 Paprsková síť	- 41 -
5.2.1 Výpočtový proud	- 42 -
5.2.2 Výpočet průřezu vodiče	- 43 -
5.2.3 Dimenzování průřezů vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu	- 44 -
5.3 Okružní síť	- 59 -
5.3.1 Výpočtový proud	- 60 -
5.3.2 Výpočet průřezu vodiče	- 60 -
5.3.3 Dimenzování průřezů vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu	- 61 -
5.4 Úbytek napětí	- 71 -
5.4.1 Úbytek napětí - Paprsková síť	- 71 -
5.4.2 Úbytek napětí – Okružní síť	- 73 -
6. Výběr optimální varianty	- 74 -
6.1 Technické zhodnocení	- 74 -
6.2 Ekonomické zhodnocení	- 77 -
7. Závěr	- 78 -
Použitá literatura:	- 79 -
Seznam příloh:	- 81 -

1. Úvod

Elektrická energie je nedílnou součástí našeho života. Zajišťuje nám teplo, světlo a jiné pro nás důležité potřeby. S tím, jak se společnost rozvíjí, spotřeba elektrické energie neustále narůstá a tím stoupá i nutnost budování nových energetických zdrojů. V současné době nejvíce elektřiny vyrobíme z fosilních paliv a jaderné energie. Dříve než kdy jindy si ale lidé začínají uvědomovat základní nevýhody těchto zdrojů. Zejména u fosilních paliv je to možnost jejich vyčerpání nebo dopady na životní prostředí při spalování. U jaderných elektráren zase hrozí značné nebezpečí při možné živelné katastrofě, teroristickém útoku nebo lidském selhání. S ohledem na tyto důvody se nejen u nás do popředí začínají dostávat obnovitelné zdroje energií, mezi něž patří i větrné elektrárny. Jejich instalovaný výkon v posledních letech neustále roste. Je ale nutné dodat, že tyto zdroje musíme uplatňovat ve vhodné míře tak, aby nenarušily stabilitu elektrických sítí a toků elektrické energie.

Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. V první kapitole teoretické části je řešena problematika volby vhodné lokality pro výstavbu větrné elektrárny. Jsou zde popsány různé měřicí přístroje a principy měření, které slouží k určení povětrnostních podmínek dané lokality, před samotnou výstavbou. Následně je zde nastíněna problematika vlivu větrných elektráren jak na životní prostředí, tak na okolní obyvatelstvo. V druhé kapitole teoretické části jsou popisovány větrné elektrárny a jejich provozování. Nejprve jsou řešeny vybrané typy větrných elektráren, které jsou u nás používány a následně je uvedena problematika podmínek připojování obnovitelných zdrojů a jejich zpětné vlivy na napájecí síť.

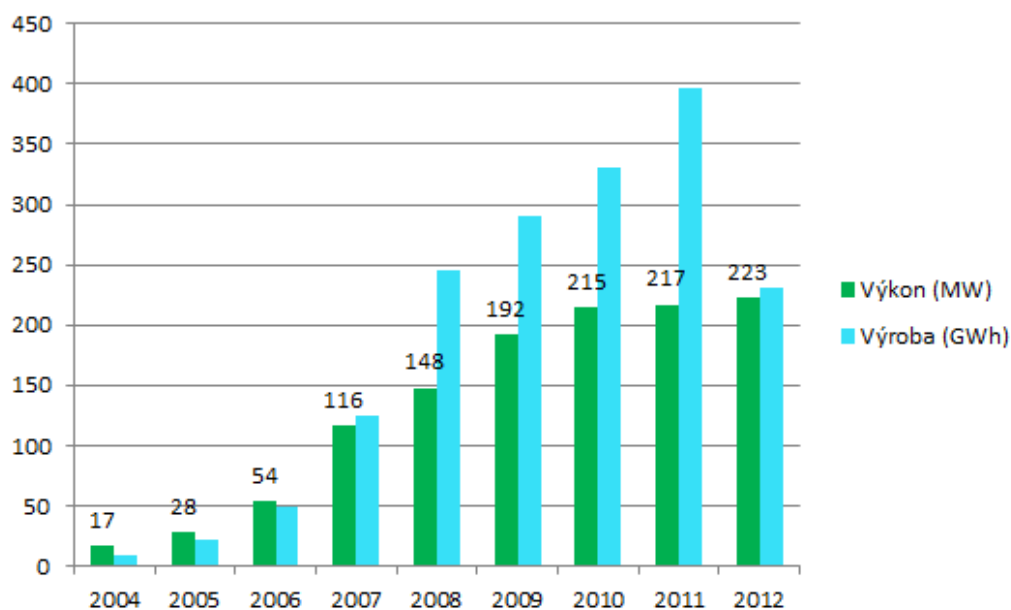
V úvodní kapitole praktické části je popsána oblast větrného parku. Na tomto místě je znázorněno rozmístění jednotlivých elektráren s ohledem na katastrální území dotčených obcí. Dále je uvedena rozvodna Boskovice, do které bude vyveden výkon z větrného parku a typy kabelů, které budou pro tento projekt používány. Následně je navrženo variantní technické řešení vyvedení výkonu větrného parku. Nalezena řešení jsou podrobně popsána a vypočtené parametry slouží jako podklad pro správné dimenzování kabeláže. Pro tyto uvažované varianty jsou následně naprojektována kabelová vedení. Na závěr je provedeno zhodnocení obou variant.

2. Úvod do problematiky větrné energie

2.1 Historický vývoj

Větrnou energii člověk využívá již několik století. První doložené historické doklady máme z Egypta, kolem roku tři sta před Kristem. Na území Evropy se energie větru začala využívat od 13. století. Šlo zejména o mlýny, nebo zařízení na čerpání vody a řezání dřeva. Na území České republiky došlo k postavení prvního mlýna v roce 1277 v zahradě Strahovského kláštera v Praze. Teprve v 18. století došlo k značnému rozvoji větrného mlynářství. V novodobé historii dochází k obrovskému rozmachu využívání energie větru jako zdroje elektrické energie až v 80. letech minulého století. Impulzem byla energetická krize v roce 1973, kdy skokově vzrostly ceny ropy a řada vyspělých států začala hledat možnosti jak využívat obnovitelných zdrojů. Průkopníkem v této oblasti se stalo zejména Dánsko (výzkumný ústav Riso) a Německo (institut pro větrnou energii Dewi).

V České republice probíhal vývoji větrné energetiky ve dvou etapách. První etapa se váže na období 1990 – 1995. Došlo zde k vybudování 24 větrných elektráren o výkonu 8,22MW. Druhá etapa nastala v roce 2003, kdy Energetický regulační úřad stanovil minimální ceny pro výkup energie z větru (3000 Kč/MWh). Tato cena se postupně snižovala až na 2340 Kč/MWh v roce 2012. Vývoj instalovaného výkonu v tomto období u nás vidíme na obr. 1.[2]

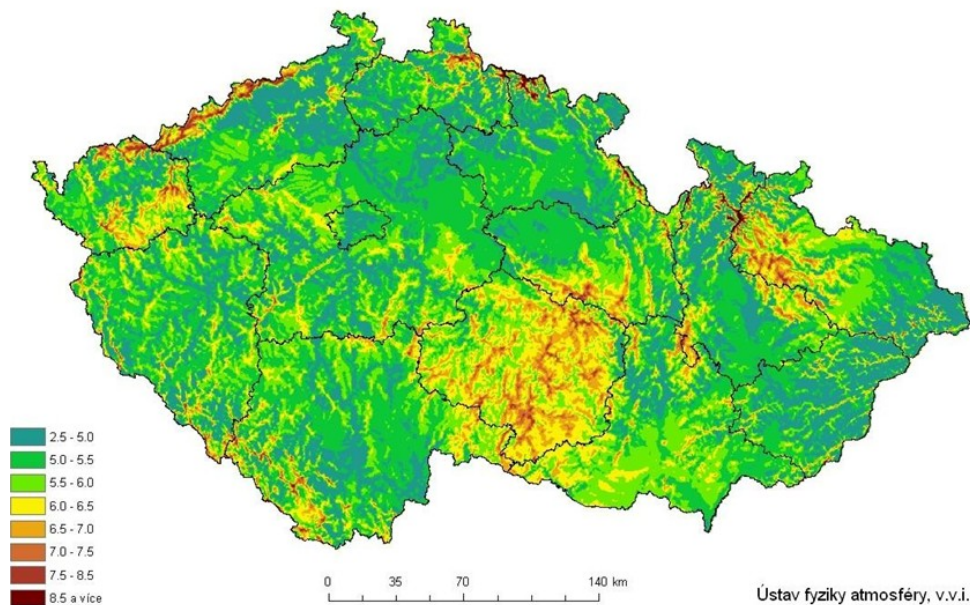


Obr. 1: Instalovaný výkon v ČR v jednotlivých letech (1.6.2012)[3]

2.2 Volba lokality

Z hlediska celosvětového jsou nejvhodnější podmínky pro vznik větrných parků zejména na moři a v přímořských oblastech. Dochází zde k pravidelnému a relativně silnému proudění větru až 80% dní v roce. U vnitrozemských států jako je Česká republika je nutné vhodné lokality pro výstavbu větrných elektráren vytipovat. Jedná se zejména o oblasti s dostatečnou průměrnou roční rychlostí větru.

Pro výběr lokality vhodné pro výstavbu nám slouží větrné mapy Obr. 2. Tyto mapy byly vytvořeny Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR interpolací údajů meteorologických stanic a z numerického modelu proudění nad naším územím.



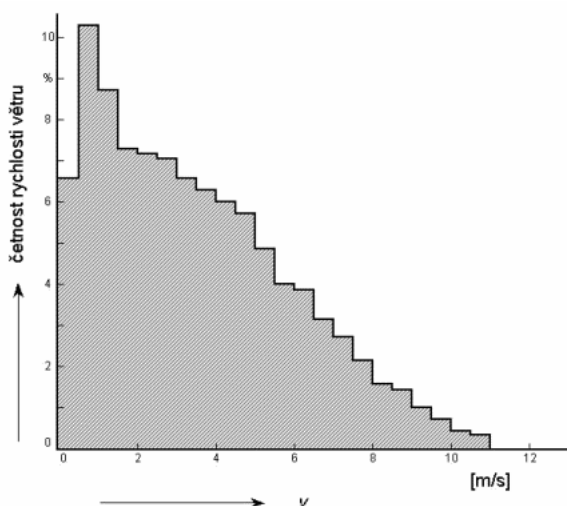
Obr. 2: Pole průměrné rychlosti větru m/s ve výšce 100m [3]

Ovšem pro umístění středních a velkých elektráren v daném prostoru je větrná mapa pouze orientační a je nutné provést přesné měření rychlosti větru.

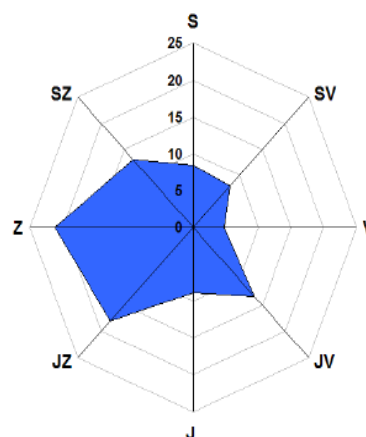
2.2.1 Větrné poměry v dané lokalitě

Z klimatologického hlediska vhodnosti místa pro větrné elektrárny jsou důležité jeho dlouhodobé větrné poměry v oblasti rotoru. Ty jsou dány četností rychlosti větru (obr. 3) a větrnou růžicí (obr. 4).

Četnost rychlosti větru nám vyjadřuje sloupcový diagram, kdy na vodorovné ose jsou vynášeny údaje o rychlosti ($m \cdot s^{-1}$) a na svislé ose poměrná délka časového úseku, kdy vítr vane uvedenou rychlostí. Větrná růžice nám dává informace o směru, ze kterého nejčastěji fouká vítr.

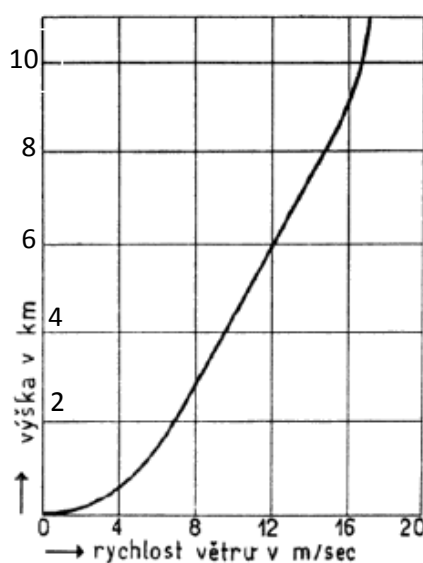


Obr. 3: Četnost rychlosti větru [1]



Obr. 4: Větrná růžice [1]

Dále je velmi důležitá závislost rychlosti větru na výšce a reliéfu povrchu. V blízkosti zemského povrchu je rychlost větru a jeho proudění ovlivňováno drsností povrchu. Vítr je nad terénem značně zpomalován překážkami charakteristickými pro danou oblast (les, skály, budovy). Zvyšuje-li se tedy výška, ve které vítr proudí, jeho rychlost se logaritmicky zvyšuje Obr. 5. Z tohoto vyplývá, že velké větrné elektrárny jsou mnohem efektivnější.[2]



Obr. 5: Závislost výšky nad zemským povrchem na rychlosti větru, tzv. kubická křivka.

2.3 Měření větru

Nejdůležitější částí v projektu výstavby větrné elektrárny je tedy měření větru. Žádná větrná mapa, ani dokonalejší matematický model nedokáže určit skutečnou dynamiku a kvalitu větrného proudění daného místa.

Při měření můžeme rozlišovat, zda se jedná o měření v jednom bodě nebo o distanční metodu měření umožňující zjišťovat povětrnostní podmínky v určité ploše. Z hlediska výběru metody je zásadní, zda chceme v dané oblasti znát pouze absolutní (skalární) rychlost větru a horizontální vektor větru, nebo úplný trojrozměrný vektor zahrnující i vertikální složku.

Důležitou součástí při měření je zaznamenávání dat. To se v naprosté většině případů děje automaticky pomocí senzorů, z nichž jsou data přenášena do záznamového zařízení. Díky tomu můžeme měření opakovat v krátkých časových intervalech, kterým říkáme vzorkovací intervaly. Tyto intervaly se v závislosti na měřicím zařízení a typu měření mohou pohybovat od zlomků sekund až po desítky minut. Ve většině případů však nedochází k vyhodnocování výsledků v plném časovém rozlišení, ale dochází ke zprůměrování. V oblasti energetiky je obvyklým průměrným intervalem 10 minut případně 1 hodina. Ze zaznamenávaných dat jsou pro nás nejdůležitější průměrná rychlost větru a průměrný směr větru. Dále se doporučuje uchovávat nejvyšší a nejnižší hodnotu rychlost v daném intervalu a směrodatnou odchylku.[2]

2.3.1 Metoda měření v bodě

Nepoužívanějším přístrojem na měření rychlosti větru je miskový anemometr Obr. 6. Senzor pracuje na principu rozdílu mezi dynamickou silou větru působícího na vypouklou a vydatou stranu misek. Proudící vítr pak uvede misky do rotačního pohybu. Rychlost pohybu misek je přímo úměrná rychlosti větru.

Nevýhodou tohoto měření je mechanický charakter zařízení. Jelikož měřicí zařízení je vystaveno venkovním vlivům, může docházet k opotřebování pohybujících se částí např. zvýšeným třením v ložiscích. Je tedy nutná pravidelná údržba a přesná kalibrace. Další nevýhodou může být tzv. overspeeding efekt. Anemometr reaguje na skokové zvýšení rychlosti větru rychleji než na zmenšení rychlosti větru. Díky tomuto efektu dochází při nárazovém nebo turbulentním proudění ve výsledku k vyšším průměrným hodnotám rychlosti větru, než ve skutečnosti jsou. Jsou vhodné k instalaci s kratším výložníkem od stožáru. Anemometry jsou méně ovlivňovány stínem samotného stožáru



Obr. 6: Miskový anemometr Thies Compact.[6]



Obr. 7: Směrovka Thies Compact.[6]

Samotný miskový anemometr měří pouze rychlost větru, doplňujeme ho většinou ještě o větrnou směrovku Obr. 7., která nám určí i směr proudění. Oba přístroje mohou být spojeny dohromady (kombinovaný senzor), a nebo provozovány zvlášť.

V současné době se stále častěji používají anemometry akustické (sonické nebo ultrasonické), obr. 8. Měřicí přístroje využívají vlastností šíření zvukových vln v prostředí. Základní výhodou u tohoto měření je, že mohou být zaznamenávány jak vertikální složky větru taky i horizontální složky větru. Navíc měření probíhá bezkontaktně a odpadá problém mechanických součástí. Dochází však ke vznikům jiných problémů a to zejména rušení signálu vlivem usazování vodních kapek, ledových krystalů či nečistot. V praxi se nejčastěji používají miskové anemometry současně s větrnou směrovkou například, Vaisala, Thies, Ammonit.[2]



Obr. 8: Akustický anemometr Thies 3D.[6]

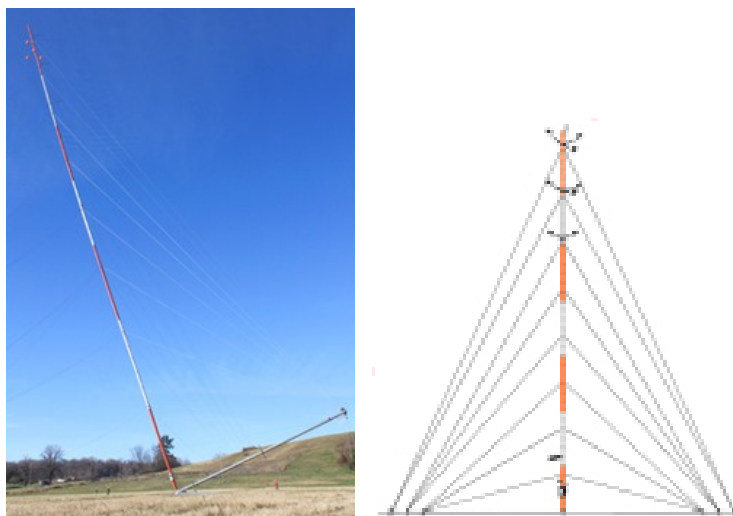
2.3.2 Distanční metoda měření

Další možností měření povětrnostních podmínek je distanční metoda. Nedochází zde k měření pouze v jednom bodě (bodová metoda), ale v celém prostoru. Získáme tak velmi kvalitní přehled o horizontálním i vertikálním vektoru větru.

Zásadními nevýhodami jsou nízká spolehlivost přístrojů (neměří za všech podmínek), dlouhý měřicí interval (k získání kompletního obrazu jsou zapotřebí jednotky až desítky minut) a vysoké pořizovací náklady. V praxi se nejčastěji využívá dopplerovský sodar pracující na principu šíření a odrazu zvukových vln od různě hustých vrstev atmosféry. Základní součástí přístroje jsou velmi citlivé vysílače a přijímače, které vyhodnocují odražený signál ve formě směru a rychlosti větru. Mohou se využívat i přístroje typu dopplerovský sodar a dopplerovský radar pracující na principech šíření světla a radiových vln.[2]

2.3.3 Meteorologický stožár

Měřicí přístroje popsané v předchozích kapitolách jsou ve většině případů umístěny na meteorologických stožárech, aby měření probíhalo co nejvýše nad zemí. Tím se sníží nejistota spojená s přepočtem rychlosti větru z výšky měření do výšky turbíny a eliminuje se vliv překážek v blízkosti elektrárny. Nejvhodnější proto je, aby se přístroje nacházely v oblasti rotoru budované elektrárny. Důležité je taky, aby měření probíhalo nejméně po dobu jednoho roku a tím se určil větrný režim ve všech ročních obdobích. Nejvíce jsou využívány mobilní trubkové a příhradové stožáry o výškách 50m až 80m. Špičkou v tomto oboru je zejména americká společnost NRG- systems Obr. 9.



Obr. 9: Meteorologický stožár NRG - systems .[5]

Stožár je vysoký 50m až 80m. Měření probíhá ve 3 až 5 výškových úrovních. Celý systém je energeticky soběstačný díky měřicí a datové elektronice a opatřením stožáru fotovoltaickým panelem a akumulátorem. Každý stožár musí být vybaven denním a nočním překážkovým osvětlením.

2.4 Dopady větrných elektráren

2.4.1 Životní prostředí

Větrné elektrárny jsou zařízení, které před výstavbou musí projít procesem posuzování vlivu na životní prostředí EIA (Environmental Impact Assessment). Tento proces je předepsán pro VtE o výkonu nad 5 kWe.

Základem tohoto procesu je zjistit, popsat a vyhodnotit případné negativní vlivy připravovaných staveb. Dále pak určit možná opatření ke zmírnění těchto negativních vlivů na životní prostředí. Jedná se zejména o míru zásahu do okolní přírody (vzhled elektrárny by měl být v souladu s krajinným reliéfem), o možnou zátěž při výstavbě a o poškozování krajiny při vyvedení výkonu (kabelové, venkovní vedení). Působením staveb na životní prostředí se zabývá zákon č 100/2001 Sb.[4]

2.4.2 Obyvatelstvo

Velmi důležitá je také vhodná vzdálenost od obydlí, z důvodu možného rušení obyvatel hlukem. Hygienické limity hluku u nás jsou ve venkovních prostorech 50dB ve dne a 40 dB v noci.

Při určování hluku z provozu větrných elektráren postupujeme následovně. Nejprve proběhne technické měření hluku instalované větrné elektrárny, což je úkol výrobce při uvádění výrobku na trh. Následuje akustická studie vycházející z údajů výrobce, která je přenesena do podmínek sledované lokality. Jako poslední proběhne hygienické měření, které má potvrdit, případně vyvrátit výsledky akustické studie. Pokud dochází ke stížnostem obyvatel na hluk VtE, může proběhnout také inspekční měření.[8]

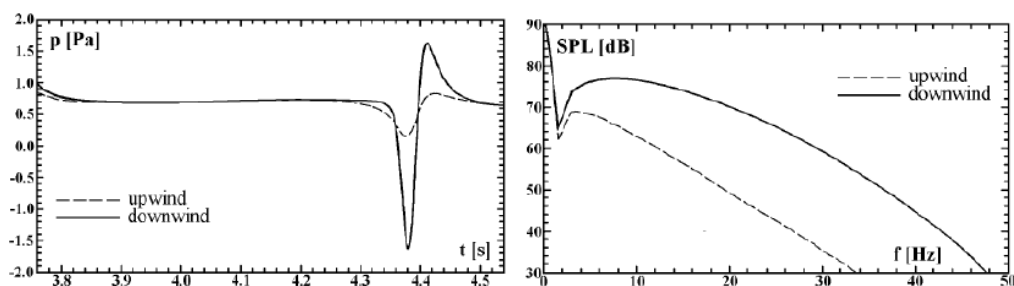
Hluk

Hluk, který vzniká ve větrných elektrárnách při výrobě elektrické energie, můžeme rozdělit na mechanický a aerodynamický.

Mechanický hluk je způsoben převodovkou, pohonem natáčení, ventilátorem chlazení, generátorem a pomocnými pohony. Jedná se o přirozené tóny, jejichž frekvence se šíří jak vzduchem, tak konstrukcí. V této oblasti šel vývoj v posledních letech velmi dopředu a podařilo se novou konstrukcí převodovek, pružným uložením, tlumením gondoly a olejovým chlazením generátoru snížit tento hluk na minimum.

Aerodynamická složka se následně dělí na tři kategorie:

- a) Nízkofrekvenční hluk: je způsoben snížením rychlosti větru za stožárem VtE (vznik turbulence). Charakter hluku (*swishing*) není přímo nízkofrekvenční, ale je amplitudovou modulací hluku s vyššími kmitočty (turbulence na špičce listu rotoru). I v tomto směru šel vývoj kupředu a musíme zde rozlišovat mezi staršími VtE s rotorem po větru (*downwind*) a moderními VtE s rotorem proti větru (*upwind*) Obr. 10.



Obr. 10: Průběhu akustického tlaku, hluku [8]

Z průběhu akustického tlaku vidíme, že VtE s rotorem po větru (*downwind*) mají 4krát větší pokles tlaku, způsobený turbulencí za stožárem. Dochází tedy ke vzniku hluku o 20 dB většímu než u modernějších VtE. Hladina akustického tlaku není ovšem závislá pouze na uložení rotoru, ale je také ovlivňována vzdáleností rotoru od stožáru a rychlostí otáčení.

- b) Hluk vstupní turbulence: je následkem rychlostních fluktuací mezi jednotlivými vrstvami vzduchu (vliv teplotního gradiendu). Ty se projevují jako vzdušné víry

vanoucí přes rotor. Jestliže je vír větší, než délka profilu, vzniká nízkofrekvenční hluk, jaký je popsán v bodě „a“. Pokud je vír menší, změny jsou pouze lokální a nenastávají na celé délce listu. Vzniká tak nestálý vysokofrekvenční hluk

c) Hluk profilu křídla: vzniká jako důsledek obtékání vzduchu profilem křídla rotoru. Má několik zdrojů:

- Hluk turbulentní mezní vrstvy na odtokové hraně
- Hluk odražené mezní vrstvy
- Hluk laminární mezní vrstvy při šíření víru
- Hluk víru na špičce listu

Při posuzování vlivu VtE na blízké okolí obydlené lidmi je pro nás kromě technického hlediska (hluk) velmi důležité i hledisko epidemiologické.

Mezi obyvateli bez ekonomického zisku a s ekonomickým ziskem z VtE není rozdíl ve schopnosti slyšet hluk, ale je markantní rozdíl v subjektivním posouzení obtěžování tímto hlukem. Dále je zajímavé, že obtěžování je větší při přímé viditelnosti, ať už z důvodu přímé hlukové expozice, nebo spíše větší pozorností způsobené přímým pohledem na větrnou elektrárnu. Epidemiologické studie jsou pro nás velmi důležité z hlediska možnosti rozlišení skutečného obtěžování hlukem od psychologických efektů větrné elektrárny.[8]

3. Větrné elektrárny a jejich provozování

3.1 Energie a výkon větru

Energii pohybujícího se větru můžeme vyjádřit následujícím vztahem (3.1), kde m je hmota vzduchu a v jeho rychlost.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Hmotu můžeme následně popsat rovnicí (3.2), pomocí objemu V a hustoty vzduchu ρ

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (3.2)$$

Kde: A – je plocha, kterou objem vzduchu protéká

s – je dráha, kterou urazí pohybující se vzduch

ρ – hustota vzduchu (1,2 kg/m³)

Z výše uvedených rovnic můžeme snadno odvodit vztah pro výkon větru protékající jednotkovou plochou.

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 \quad (3.3)$$

Následně aplikujeme

$$\frac{s}{t} = v \quad (3.4)$$

Dosazením vztahu 3.4 do rovnice 3.3 získáme konečný vztah pro výkon větru.

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (3.5)$$

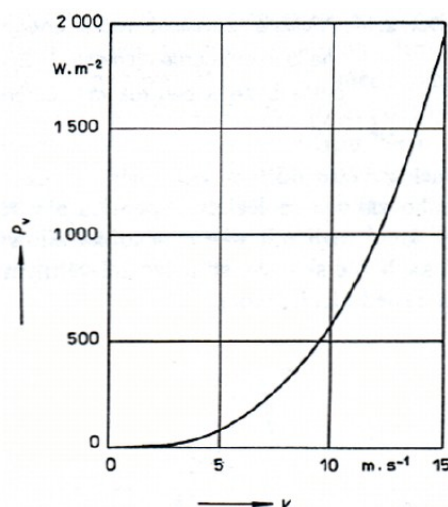
Z tohoto vztahu je patrné, že výkon protékající jednotkovou plochou 1 m² je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti větru. Závislost výkonu větru P_v na rychlosti větru je patrná na obrázku 11.

Protože výkon větru i jeho rychlost jsou časově proměnné veličiny, můžeme pro energii větru za určité období napsat vztah

$$E_v = \int_{t_0}^t P_v \cdot dt \quad (3.6)$$

Pro zjednodušení můžeme uvažovat, že v určitém časovém intervalu je teplota a hustota vzduchu konstantní. Můžeme tak rovnici upravit do následujícího tvaru:

$$E_v = \frac{\rho}{2} \cdot \int_{t_0}^t v^3 \cdot dt \quad (3.7)$$



Obr. 11: Závislost výkonu větru protékajícího plochou 1m² na jeho rychlosti[1]

3.2 Větrné motory

Větrné motory (rotory) jsou zařízení VtE sloužící k přeměně kinetické energie věru na energii mechanickou, která je následně měněna na energii elektrickou. Dělení větrných motorů je možné podle velkého množství hledisek. Nejdůležitější rozdělení je ovšem podle základního kritéria a to je aerodynamický princip.

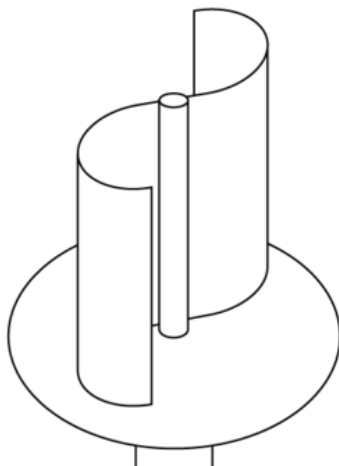
- Motory odporové
- Motory vztlkové

Další možnosti rozdělování rotorů může být podle osy otáčení (horizontální, vertikální), instalovaného výkonu (rozměry lopatek) a rychlostního součinitele (pomaluběžné, rychloběžné).

3.2.1 Větrné motory odporové

Odporové větrné motory patří mezi nejstarší. Mohou mít osu otáčení vodorovnou i svislou. Základním principem je, že plocha nastavená proti větru mu klade aerodynamický odpor, vzduch zpomaluje a je jím vyvozena síla, která je mechanicky přeměněna na rotační pohyb. Důležité je aby obvodová rychlost byla vždy menší než rychlost větru a tím by došlo ke vzniku hnacího kroutícího momentu.

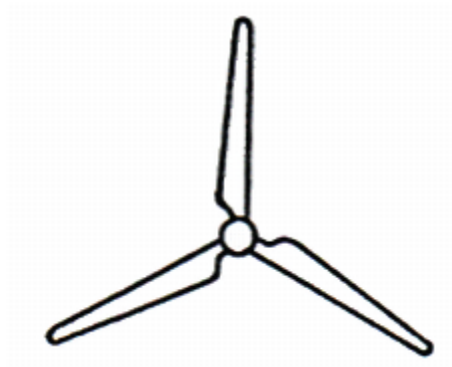
Tento typ větrných motorů pracuje s účinností 15-23%. To má za následek velmi nízké používání v nejmodernějších energetických koncepcích. Klasickým představitelem v této oblasti je Savoniův motor Obr. 12. [1]



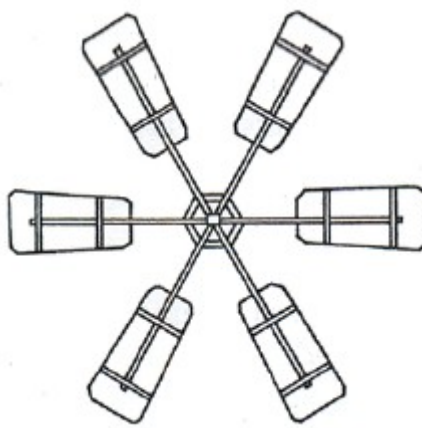
Obr. 12: Savoniův větrný motor[1]

3.2.2 Větrné motory vztlakové

Na principu vztakových větrných motorů pracují zejména vrtule a větrná kola s vodorovnou osou otáčení orientovanou kolmo ke směru větru Obr. 13.



Obr. 13: Vrtule větrného motoru.[1]



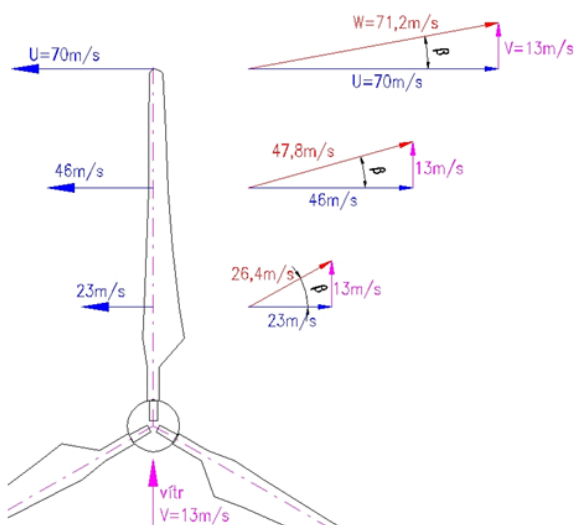
Obr. 14: Větrné kolo[1]

Větrná kola mají obvykle jednoduché plechové lopatky, jejichž množství se pohybuje od čtyř do několika desítek podle velikosti větrného kola a podle požadované rychloběžnosti.

Vrtule je v současné době nejpoužívanější systém pro výrobu elektrické energie. Nejčastější je třílísté provedení, mohou být však realizovány jako dvoulísté nebo jednolísté. V této oblasti došlo v posledních letech ke značnému technologickému posunu. Jednotlivé listy jsou vhodně aerodynamicky tvarovány a také umožňují natáčení podél své osy. Tím napomáhají k snadnějšímu rozběhu, regulaci otáček i aerodynamickému brzdění. Viz. kapitola 3.2.3.[1]

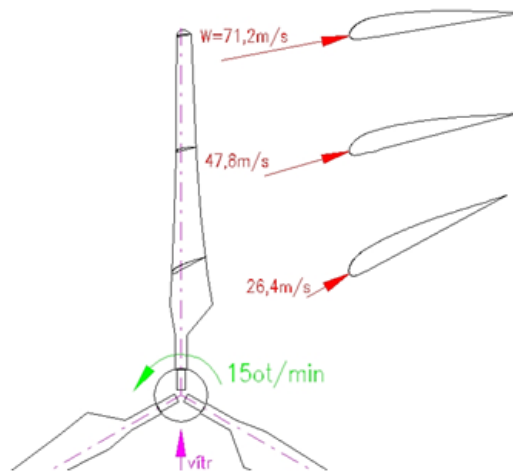
3.2.3 Aerodynamika vztlakového větrného motoru

Na obrázku 15 vidíme jednotlivé obvodové rychlosti rotorového listu v $1/3$ délky, $1/2$ délky a na špičce rotoru při rychlosti větru 13 m/s . Je zřejmé, že obvodová rychlost se po délce listu mění. Důležité ovšem pro nás je rychlost a směr, pod kterým vzduch proudí na rotorový list. Rychlost nabíhajícího proudícího vzduchu (W) získáme jako vektorový součet obvodové rychlosti pohybujícího se rotorového listu U (po délce listu proměnná) a rychlosti větru V (konstantní).



Obr. 15: Výsledná rychlost nabíhajícího proudu vzduchu (W) na list rotoru[3]

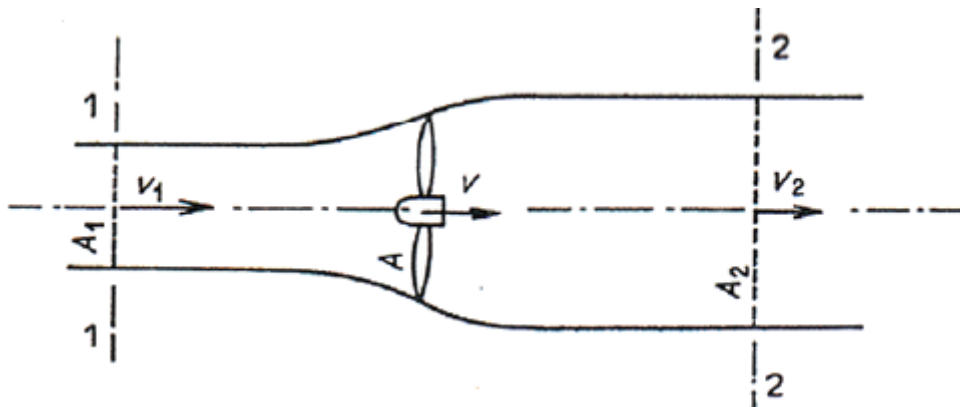
Z výsledku je zřejmé, že po celé délce listu se mění jak nabíhající rychlost, tak úhel nabíhání proudu k rovině rotoru. Chceme-li tedy, aby aerodynamický profil pracoval po celé délce listu co nejúčinněji, je nutné tento profil natočit tak, aby byl optimálně obtékán vzduchem obr. 16.[3]



Obr. 16: Optimální natočení aerodynamického profilu[3]

3.2.4 Princip funkce vztlačových motorů

Principem větrných motorů je, že zpomalují proud vzduchu protékající jejich pracovní plochou a tím odebírají část jeho energie. Je tedy jasné, že nemůžeme získat víc energie, než vítr obsahuje. Obrázek 17 ukazuje proud vzduchu proudící větrným motorem. Ve vodorovném směru je vítr omezen plochami 1 a 2, v nichž má rychlost v_1 a v_2 a protéká průřezy A_1 a A_2 . V rovině vrtule máme plochu A a rychlost proudu v .



Obr. 17: Proud vzduchu protékající vrtulí[1]

V oblasti ohraničené proudovými plochami se nepřenáší hmota ani energie, proto můžeme tento stav popsat rovnicí kontinuity:

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad (3.8)$$

Dále můžeme odvodit axiální sílu působící na listy rotoru ze zákona zachování hybnosti.

$$F_a = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.9)$$

Následně můžeme odvodit výkon větru a výkon určený ze změny kinetické energie větru proudícího za sekundu kontrolní plochou.

$$P = F_a \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (3.10)$$

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.11)$$

Porovnáním rovnic (3.10) a (3.11) získáme vztah pro rychlost v :

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3.12)$$

Upravením rovnic následně dostaneme vztah pro axiální sílu působící na listy rotoru a výkon rotoru.

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.13)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (3.14)$$

Poměrem výkonu motoru a výkonu větru nám vznikne vztah pro ideální účinnost přeměny kinetické energie na mechanickou. Vztah platí pouze při ideálním větrném motoru s nekonečným počtem lopatek pracujících bez aerodynamického odporu.

$$\eta = \frac{(v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{2 \cdot v_1^3} \quad (3.15)$$

Ve výše uvedené rovnici je popsán pouze výkon vzduchové hmoty. Chceme-li definovat výkon větrného motoru, musíme celou rovnici vynásobit součinitelem výkonnosti c_0 .

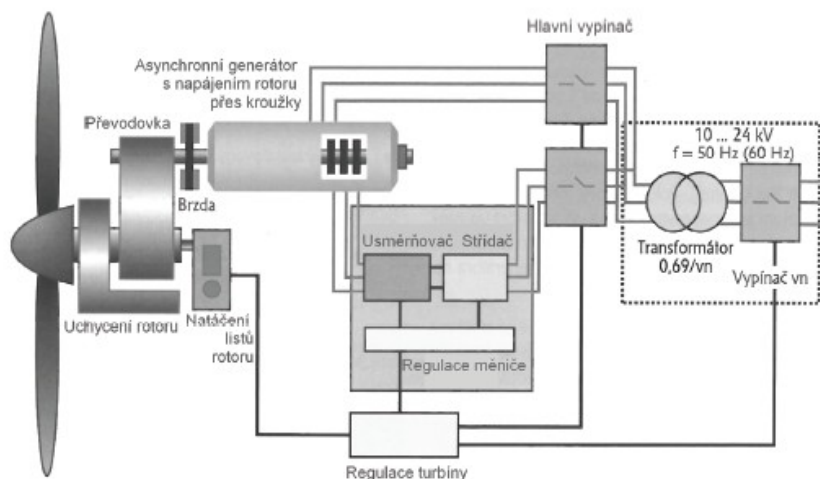
Ten nám udává, kolik energie z proudícího vzduchu se využije na turbíně. Jeho maximální hodnota dosahuje $c_0 = 0,59$. Není ovšem konstantní a s rychlostí větru kolísá. Největší je pro střední rychlost větru.

3.3 Elektrická zařízení větrných elektráren

K výrobě elektrické energie se ve větrných elektrárnách využívají asynchronní nebo synchronní generátory. Oba dva generátory mají své výhody i nevýhody. Přední světový výrobce větrných elektráren dánská společnost VESTAS využívá systém s asynchronním generátorem. Naopak německá společnost ENERCON využívá ve svých větrných elektrárnách synchronní generátor.

3.3.1 Systém s asynchronním generátorem

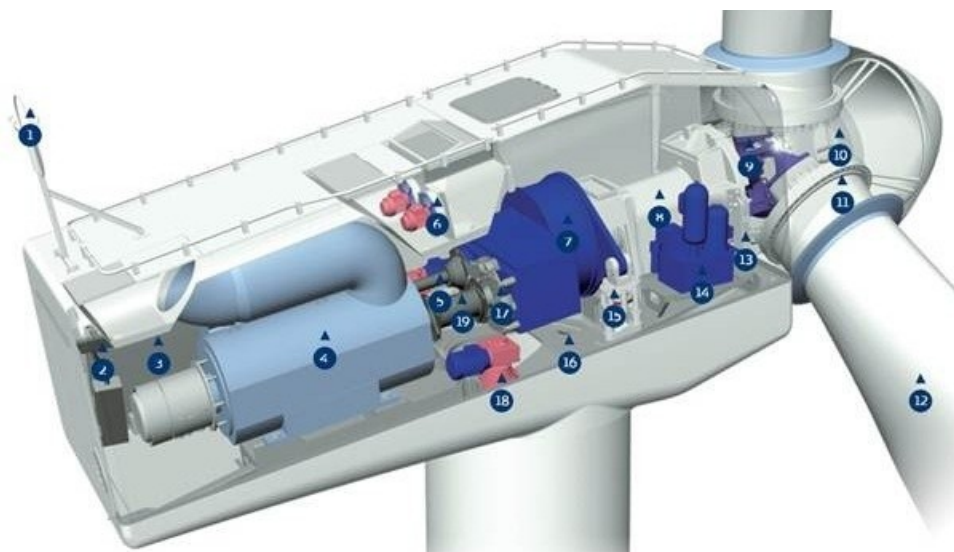
Asynchronní generátor se používá ve větrných elektrárnách středních a velkých výkonů. V porovnání se synchronním je finančně méně náročný a z provozního hlediska spolehlivější. Má také jednodušší rozběh a snadnější připojení na síť. Jeho základní nevýhodou je nízké regulační rozpětí otáček. V této oblasti ovšem došlo ke značnému posunu a u generátorů s vyšším instalovaným výkonem můžeme provozovat větrnou elektrárnu i při nižších otáčkách turbíny, tedy při nižších rychlostech větru. Je to umožněno asynchronním generátorem s napájeným rotorem (podsynchronní kaskáda) obr. 18. Toto zapojení umožňuje zvýšení rozsahu skluzu v generátorickém provozu sklonem momentové charakteristiky. [9]



Obr. 18: Asynchronní generátor s napájeným rotorem[9]

Dochází zde ke spolupráci frekvenčního měniče s asynchronním generátorem s kroužkovou kotvou. Systém pracuje v kaskádním zapojení, což znamená, že stator generátoru je přímo připojen do elektrizační soustavy (přes NN/VN transformátor) a rotor generátoru je

napájen z frekvenčního měniče. Celý chod je řízen multiprocesorově, aby docházelo k maximálnímu využití větrné energie a minimalizoval se negativní vliv na distribuční soustavu.[3]

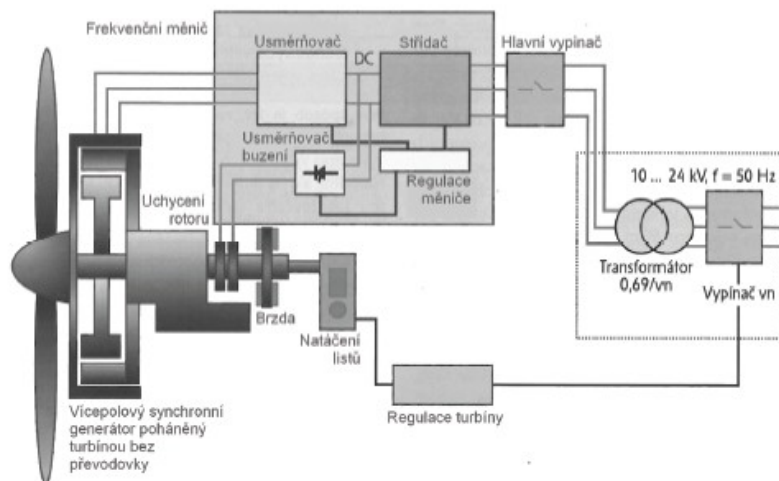


Obr. 19: Strojovna větrné elektrárny VESTAS V90[3]

1 – ultrazvukový anemometr, 2 – servisní jeřáb, 3 - VMP regulátor s konvertorem, 4 – asynchronní generátor, 5 – hydraulický válec natáčení rotorových listů
6 – ventilátory chlazení, 7 – převodovka, 8 – pomalý hřídel, 9 – natáčení rotorových listů
10 – rotorová hlava, 11 – ložisko rotorového listu, 12 – rotorový list, 13 – systém aretace
14 – hydraulický agregát, 15 – držák převodovky, 16 – nosným rám strojovny
17 – mechanická kotoučová brzda, 18 – pohon natáčení strojovny větrné elektrárny 19 – rychlý hřídel

3.3.2 Systém se synchronním generátorem

Synchronní generátory se využívají zejména u větrných elektráren s velkým instalovaným výkonem. Nejmodernější VtE pracují se synchronním generátorem poháněným přímo turbínou bez použití převodovky. Budicí vinutí je tedy přímo umístěno na rotoru. Díky tomuto provedení značně klesá hmotnost gondoly. Klesají hlukové emise a eliminují se ztráty, které vznikaly v tomto zařízení. Zároveň se ale zvětšují rozměry generátoru obr. 20.



Obr. 20: Synchronní generátor poháněný přímo turbínou[9]

Podle rychlosti větru, tedy podle velikosti kroutícího momentu se uvádějí do provozu jednotlivé pólové dvojice. Nemusí být tedy použita převodovka. Dále je výstupní napětí a frekvence z generátoru upravována frekvenčním měničem a vedena přes transformátor do distribuční soustavy. Podle parametrů sítě je elektrárna regulována multiprocesorem.

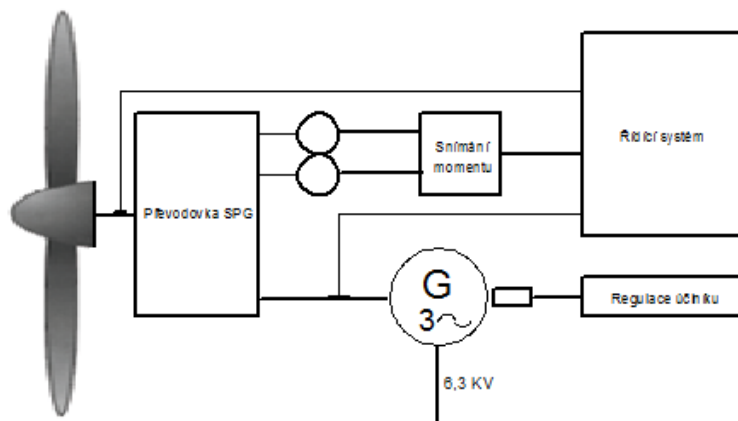


Obr. 21: Větrná elektrárna ENERCON[3]

Zelená část je rotorová hlava. Za ní následují prstence generátoru. Žlutá část je pak nosný rám strojovny s pohony pro natáčení.

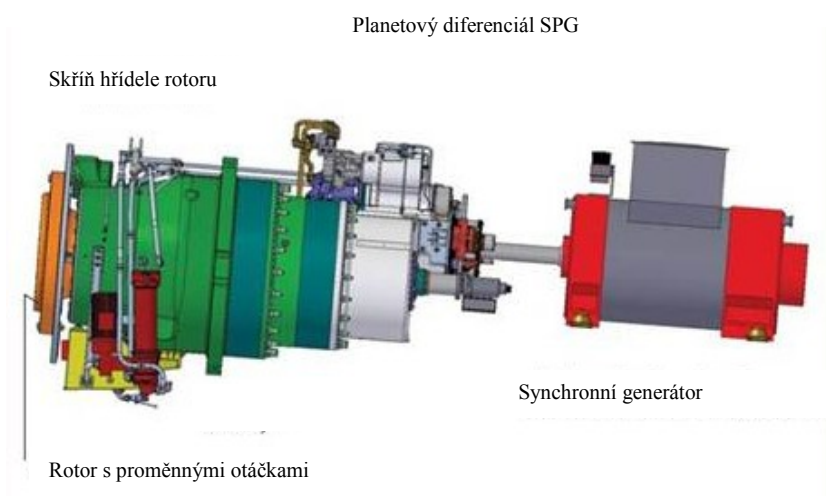
3.3.3 Systém se synchronním generátorem a variátorem

Tento systém vyvinul český výrobce větrných elektráren společnost Wikov. Ze všech tří zde uvedených principů má nejvyšší účinnost. Proměnlivé otáčky rotoru přeměňuje převodovka s variátorem (SPG – super position gear) na konstantní otáčky na vstup generátoru. Synchronní generátor pak při konstantních otáčkách vyrábí elektrickou energii, kterou je možné přímo dodávat do rozvodné sítě.



Obr. 22: Systém převodovkou SPG [10]

Charakteristickým znakem pro tento systém je, že převodovka s proměnným převodovým poměrem (SPG) umožňuje plynulou změnu převodového poměru v celém rozsahu otáček rotoru. Odpadá tedy nutnost frekvenčních měničů a další elektroniky. Nevýhodou je nízká provozní spolehlivost zapříčiněná nedostatkem finančních prostředků pro další rozvoj.



Obr. 23: Detail pohonné soustrojí větrné elektrárny Wikov W2000. [10]

3.4 Připojení a provozování VtE v soustavě vn a 110kV

Při pořizování výroby je nutné dbát na platné předpisy a nařízení, aby byla výroba vhodná pro provoz se sítí a bylo vyloučeno zpětné ovlivňování sítě nebo dalších zařízení k ní připojených. Hlavní sledované parametry, jimiž je hodnocena velikost ovlivnění distribuční soustavy a chování výroben, jsou zejména velikost a změny napětí, ovlivnění HDO, míra dlouhodobého flikru a proudy harmonických vyšších řádů.

Při zřizování a provozování elektrických zařízení je nutno dodržovat:

- platné zákony a předpisy, především [11] [12], [13] a [14].
- platné normy ČSN, podnikové normy energetiky (PNE), případně podnikové normy provozovatele distribučních soustav (PDS).
- nařízení a směrnice PDS.

3.4.1 Podmínky pro připojení

Než dojde k připojení větrné elektrárny nebo farmy větrných elektráren do distribuční sítě, musí projekt projít přihlašovací řízením. Přihlašovací řízení musí obsahovat žádost o připojení, studii připojitelnosti a projektovou dokumentaci. Podmínky pro připojení jsou dány Pravidly provozování distribuční sítě (PPDS), příloha 4. [11]

Zvýšení napětí

Zvýšení napětí vyvolané připojením výroben nesmí v nejnepříznivějším případě překročit 2% pro výroby s připojeným místem v síti vn a 110kV ve srovnání s napětím bez jejich připojení.

$$\Delta u_{vn,110} \leq 2\% \quad (3.16)$$

Jeli v síti vn pouze jedno přípojně místo, je možné uvedenou podmínku řešit pomocí zkratového poměru výkonů.

$$k_{k1} = \frac{S_{KV}}{\sum S_{AMAX}} \quad (3.17)$$

S_{KV} : zkratový výkon v přípojném bodě

$\sum S_{AMAX}$: součet maximálních zdánlivých výkonů připojených /plánovaných výroben

Změny napětí při spínání

Ve společném napájecím bodě dochází ke změně napětí vyvolané připojováním a odpojováním jednotlivých generátorů. K nepřijatelnému zpětnému vlivu nedojde, pokud nejvyšší změna napětí v síti vn nepřekročí 2% tj.

$$\Delta u_{maxvn} \leq 2\% \quad (3.18)$$

Pro výrobní v síti 110 kV platí:

- normální provoz, spínání pouze jednoho zdroje

$$\Delta u_{max} \leq 0,5\% \quad (3.19)$$

- normální provoz, spínání celého zařízení (větrný park)

$$\Delta u_{max} \leq 2\% \quad (3.20)$$

- poruchový provoz

$$\Delta u_{max} \leq 5\% \quad (3.21)$$

Připojování synchronních generátorů

Musí být splněny následující podmínky pro synchronizaci:

- rozdíl napětí $\Delta U < \pm 10\% U_n$.
- rozdíl frekvence $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$.
- rozdíl fáze $< \pm 10^\circ$.

Připojování asynchronních generátorů

Asynchronní generátory rozbíhané pohonem musí být připojeny bez napětí při otáčkách v mezích 95% až 105% synchronních otáček. U asynchronních generátorů, které jsou připojovány bez napětí, je nutno dodržet podmínky jako u připojování synchronních generátorů.[11]

3.4.2 Chování výroben v síti

Zdroje, které dodávají do sítě elektrickou energii, se musejí podílet na udržování napětí. Rozlišujeme zde mezi statickou a dynamickou podporou sítě. Hodnoty a charakteristiky pro podporu sítě udává provozovatel distribuční sítě (PDS).

Statickou podporou se rozumí udržování napětí ve stanovených mezích při pomalých změnách napětí

Dynamické udržování sítě je udržování napětí při poklesech napětí na vedení vvn a zvn, zamezující odpojení výkonů a rozpad sítě.[9]

Přizpůsobení činného výkonu

Zdroje připojené do distribuční soustavy musí umožňovat snižovat činný výkon automaticky podle kmitočtu v síti f_s , nebo podle příkazů z dispečinku provozovatele distribuční soustavy.

U zdrojů, které se automaticky neodpojí, musí dojít při kmitočtu nad 50,2Hz ke snižování činného výkonu gradientem 40% na 1Hz.

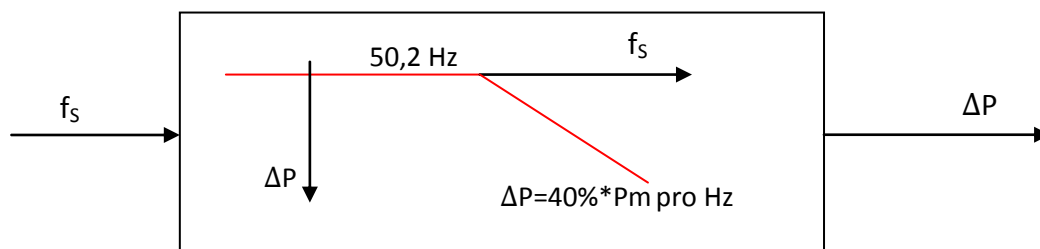
$$\Delta P = 20P_m \cdot \frac{50,2\text{Hz} - f_s}{50\text{Hz}} \quad (3.22)$$

Kde ΔP je snížený výkon f_s je frekvence sítě a P_m snižovaný výkon.

Spektrum f_s :

$$47,5\text{Hz} < f_s < 50,2\text{Hz} \text{ žádné odpojení} \quad (3.23)$$

$$f_s \leq 47,5\text{Hz} \text{ a } f_s \geq 51,5\text{Hz} \text{ odpojení od sítě} \quad (3.24)$$



Obr. 24: Snížení činného výkonu obnovitelných zdrojů při nad frekvenci.

Řízení jalového výkonu

Ovládání jalového výkonu se děje vždy podle konkrétního místa distribuční soustavy a stanovuje ho PDS po domluvě s výrobcem.

U výroben zapojených do sítí vn a 110 kV musí být jalový výkon řiditelný od 100kVA instalovaného výkonu a smluvený rozsah jalového výkonu musí být využitelný do několika málo minut. Při dodávání činného výkonu je hodnota jalového výkonu určena buď pevnou hodnotou, nebo když je to vyžadováno provozem soustavy, dálkově nastavitelnou žádanou hodnotou. Žádaná hodnota je buď:

- pevná hodnota zadaného účinníku $\cos \varphi$
- hodnota účinníku $\cos \varphi = f(P)$
- zadaná hodnota jalového výkonu
- zadaná hodnota napětí
- charakteristika $Q(U)$

Způsob řízení i žádané hodnoty určuje provozovatel distribuční sítě individuálně pro každou výrobu podle jejich technických možností a potřeby sítě v daném místě.

3.4.3 Zpětné vlivy na napájecí síť

Aby nedocházelo k rušení zařízení odběratelů připojených k distribuční soustavě, je nutné omezit zpětné vlivy lokálních výroben. Pro posouzení zpětných vlivů a jejich působení na DS je nutné vyjít z maximálních přípustných mezí, které jsou dány příslušnými normami a nařízeními [11] případně [15], [16], [17].

Změna napětí

Přípustná změna napětí pro společný napájecí bod v síti vn a 110kV je:

$$\Delta u_{maxvn} \leq 2\% \quad (3.25)$$

Kolísání napětí

Ve společném napájecím bodě vn a 110kV musíme kolísání napětí vyvolávající dlouhodobý flikr dodržet na mezní hodnotě[11]

$$P_{lt,vn} \leq 0,46 \quad (3.26)$$

$$P_{lt,110} \leq 0,37 \quad (3.27)$$

U zdrojů s mnoha jednotlivými zařízeními je nutné vypočítat P_{lt} pro každé samostatně a výslednou hodnotu flikru určit ze vztahu:

$$P_{lt,res} = \sqrt{\sum_i P_{lt,i}^2} \quad (3.28)$$

Harmonické a meziharmonické proudy

Harmonické proudy vyšších řádů vznikají zejména u výroben s frekvenčními měniči nebo střídači, ale i u různých typů generátorů. Harmonické a meziharmonické proudy vysílané těmito zařízeními musí udat výrobce a nesmí překročit hodnoty udávané normou.

Výrobní v síti vn

Pro jediné přípojné místo v síti vn můžeme určit přípustné harmonické proudy $I_{vpř}$ ze vztažných proudů $i_{vpř}$ (tabulka 1) vynásobených zkratovým výkonem v napájecím bodě.

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot S_{kV} \quad (3.29)$$

Jestliže je ve společném napájecím bodě zapojeno více zařízení, pak se určuje velikost přípustných harmonických proudů vyšších řádů následujícím vztahem:

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_{AV}}{S_S} \quad (3.30)$$

Kde S_{AV} je zdánlivý výkon zařízení a S_S určuje celkový možný připojitelný výkon ve společném napájecím bodě. Výsledné dovolené harmonické proudy pro síť vn vztažené na zkratový výkon jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Vztažné proudy harmonických pro výrobní do sítí vn[11]

Řád harmonické $\nu (-)$	Přípustný vztažný proud $i_{\nu n}$ (A/MVA)		
	Sít' 10 kV	Sít' 22 kV	Sít' 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,010	0,005	0,003
>25 nebo sudé	0,06/ ν	0,03/ ν	0,017/ ν

Výrobní v síti 110kV

Pro zařízení připojené do sítě 110kV jsou celkové dovolené harmonické proudy udávány v Tab. 2.

Tab. 2: Vztažné proudy harmonických pro výrobní do sítí 110kV[11]

Řád ν, μ	Příslušný vztažný proud harmonických
5	2,6
7	3,75
11	2,4
13	1,6
17	0,92
19	0,70
23	0,46
25	0,32
>25 nebo sudé	5,25/ μ
$\mu < 40$	5,25/ μ
$\mu > 40^3$	16/ μ

Pro proudy harmonických do 13. řádu se výsledná hodnota určí ze vztahu (3.31) a pro harmonické řádu vyšších jak 13, pak ze vztahu (3.32)

$$I_{\nu zul} = i_{\nu, \mu zul} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_0} \quad (3.31)$$

$$I_{\nu zul} = i_{\nu, \mu zul} \cdot S_{kV} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_0}} \quad (3.32)$$

Kde: $I_{\nu zul}$ přípustný harmonický proud výrobního zařízení

S_{kV} zkratový výkon v přípojném bodě

S_A přípojný výkon výrobního zařízení

Vliv na zařízení HDO

Systémy hromadného dálkového ovládání (HDO) jsou většinou provozovány s frekvencí 183,3 až 283,3 Hz. Úroveň vysílání je obvykle mezi 1,6% až 2% U_n . Signál HDO je ovlivňován zejména vlastním zařízením výroby a zvýšeným zatížením sítě z důvodu připojené výroby.

Důsledkem těchto vlivů může dojít k rušení signálu HDO ve společném napájecím bodě. U výroben připojených do sítí vn a 110kV však nesmí dojít k poklesu hladiny signálu o více než 5% jeho změřené hodnoty za předpokladu, že bude dodržena minimální úroveň signálu HDO podle tab. 3.

Tab. 3: Minimální úroveň signálu HDO [17]

Minimální úrovně signálu HDO		
Úroveň napětí sítě [kV]	Minimální úroveň řídicího napětí $U_{f \min}$ vztažená k funkčnímu napětí přijímače $U_f=100\%$	
	$f_f < 350 \text{ Hz}$	$f_f = 760 \text{ a } 1060 \text{ Hz}$
0,4	150 % U_f	280 % U_f
vn	190 % U_f	360 % U_f
110	200 % U_f	-

Mimo omezování hladiny HDO nemohou být také emitována rušivá napětí:

- zdrojem vysílané rušivé napětí, jehož frekvence souhlasí nebo leží v blízkosti s místní frekvencí HDO nesmí překročit $0.1\% U_n$.
- výrobnou produkovaná napětí s frekvencí do 100Hz nebo nad 100Hz s místně použitým HDO nesmí překročit v přípojném bodu $0.3\% U_n$.

Bez posuzování můžeme k síti připojit výroby, jejichž výkon v přípojném bodě a v celé síťové oblasti nepřesáhne hodnoty v tabulce 4.

Tab. 4: Podmínky pro připojení výroby bez posouzení vlivu na HDO [17]

Napěťová úroveň [kV]	Celkový výkon výrobních zařízení	
	V přípojném bodu	V síťové oblasti
0,4	10 kVA ⁶	20 kVA ²
vn	2 MVA	4 MVA
110	20 MVA	40 MVA

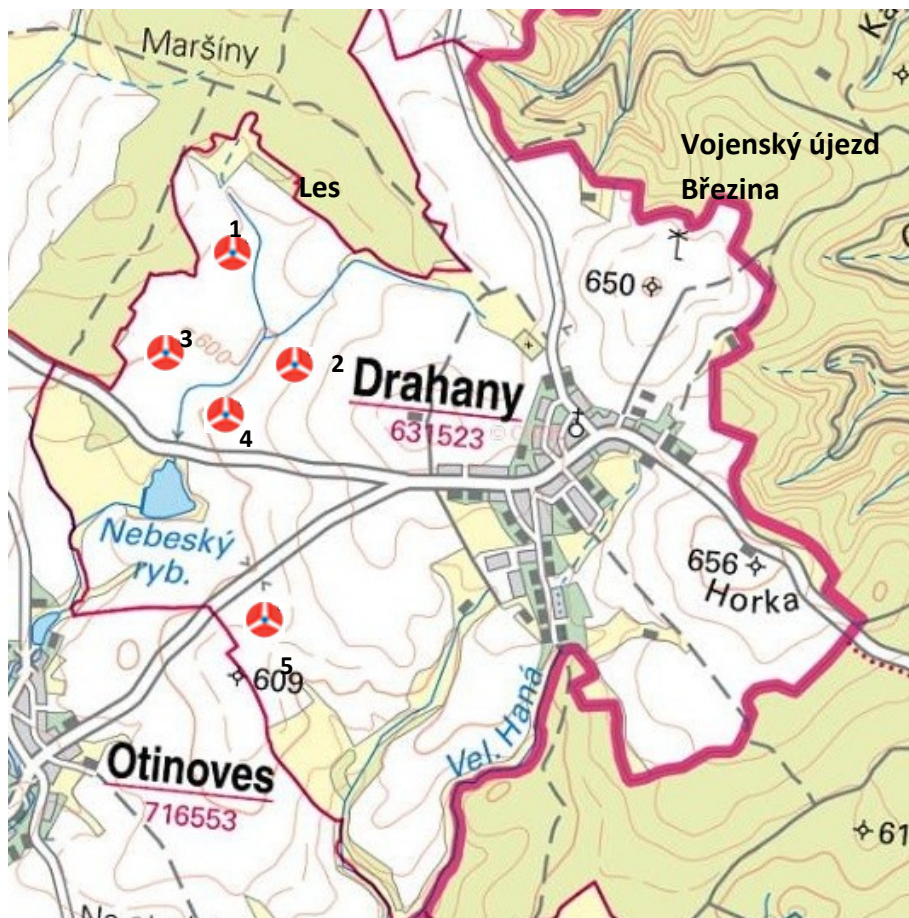
4. Popis řešené lokality větrného parku

4.1 Oblast elektráren

Větrné elektrárny budou instalovány v Olomouckém kraji v západní části okresu Prostějov. Jedná se o katastry obcí Drahany, Otínoves a Rozstání. Celkový počet elektráren ve větrném parku bude 13 a půjde o modely Vestas V112 o výkonu 3MW.

Drahany

V katastru obce bude umístěno pět větrných elektráren. Při jejich rozmisťování byla dodržována určitá kritéria. Obec Drahany požadovaly umístit elektrárny v severozápadní části katastru tak, aby co nejméně narušovaly krajinný ráz a byly v dostatečné vzdálenosti od obydlí s ohledem na hlučnost VtE (800m). Dalšími limitními faktory byly ochranné pásmo lesa 50m a minimální vzdálenost od vojenského prostoru Březina 1000m. Velmi důležitá je také vzdálenost mezi jednotlivými elektrárnami, která by měla být minimálně pětinašobek průměru rotoru, aby nedocházelo k vzájemnému působení jednotlivých elektráren. U VtE Vestas V 112 o průměru rotoru 112m je tedy minimální vzdálenost 560m.



Obr. 25: Katastr obce Drahany s vyznačením polohy větrných elektráren [18]

Otinoves

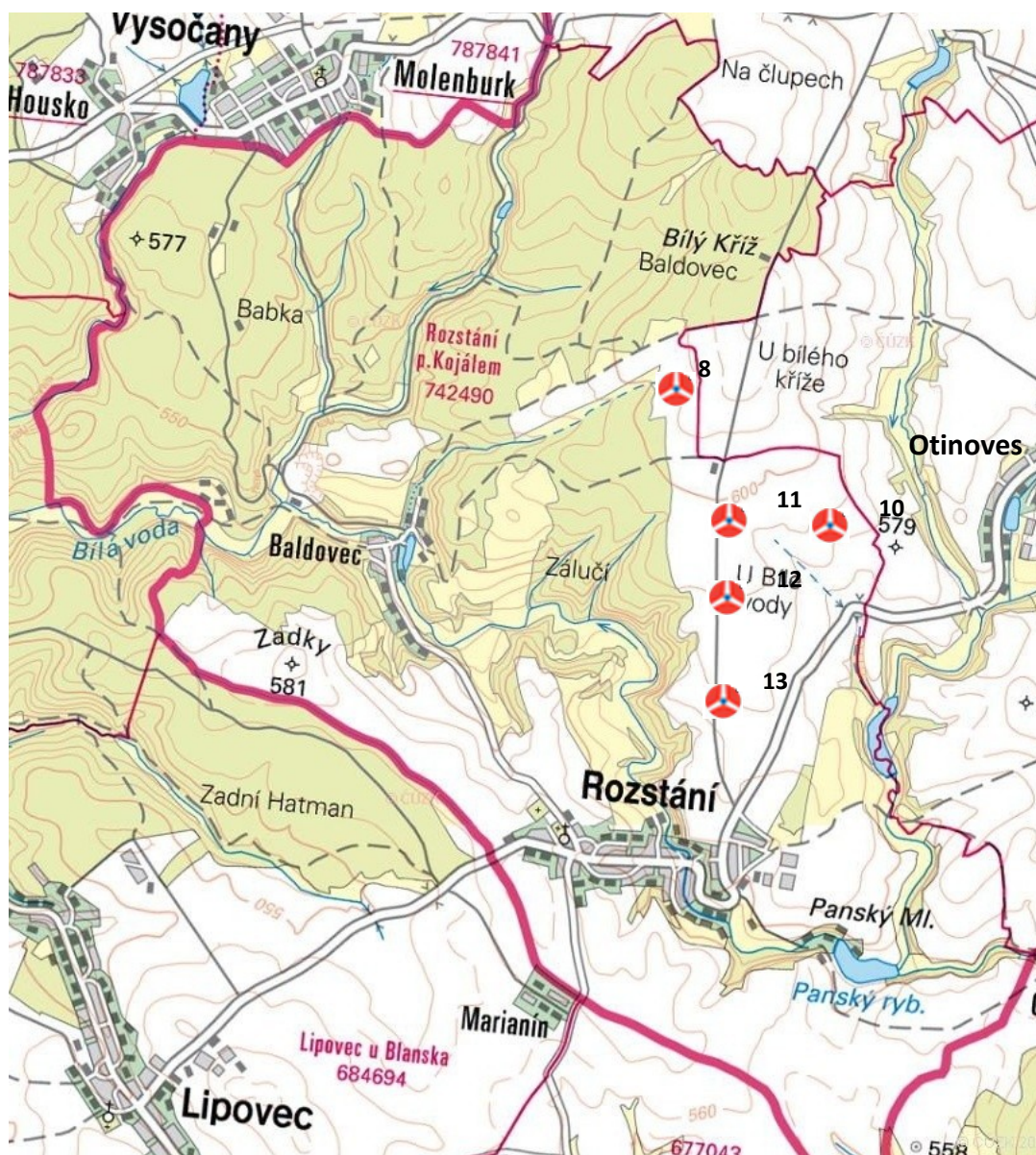
V oblasti této obce budou instalovány tři elektrárny. Větrná elektrárna č. 6, bude umístěna v severní části katastru tak, aby byla co nejblíže elektrárnám v obci Drahaný. A větrné elektrárny č. 7 a 9, které budou instalovány v západní části, budou co nejvíce přiléhat k elektrárnám v katastru obce Rozstání. Poloha elektráren je volena s ohledem na požadavky obce Otinoves, což je dodržení minimální vzdálenosti od obydlí 800m a dodržení ochranného pásma lesa 50m.



Obr. 26: Katastr obce Otinoves s vyznačením polohy větrných elektráren [18]

Rozstání

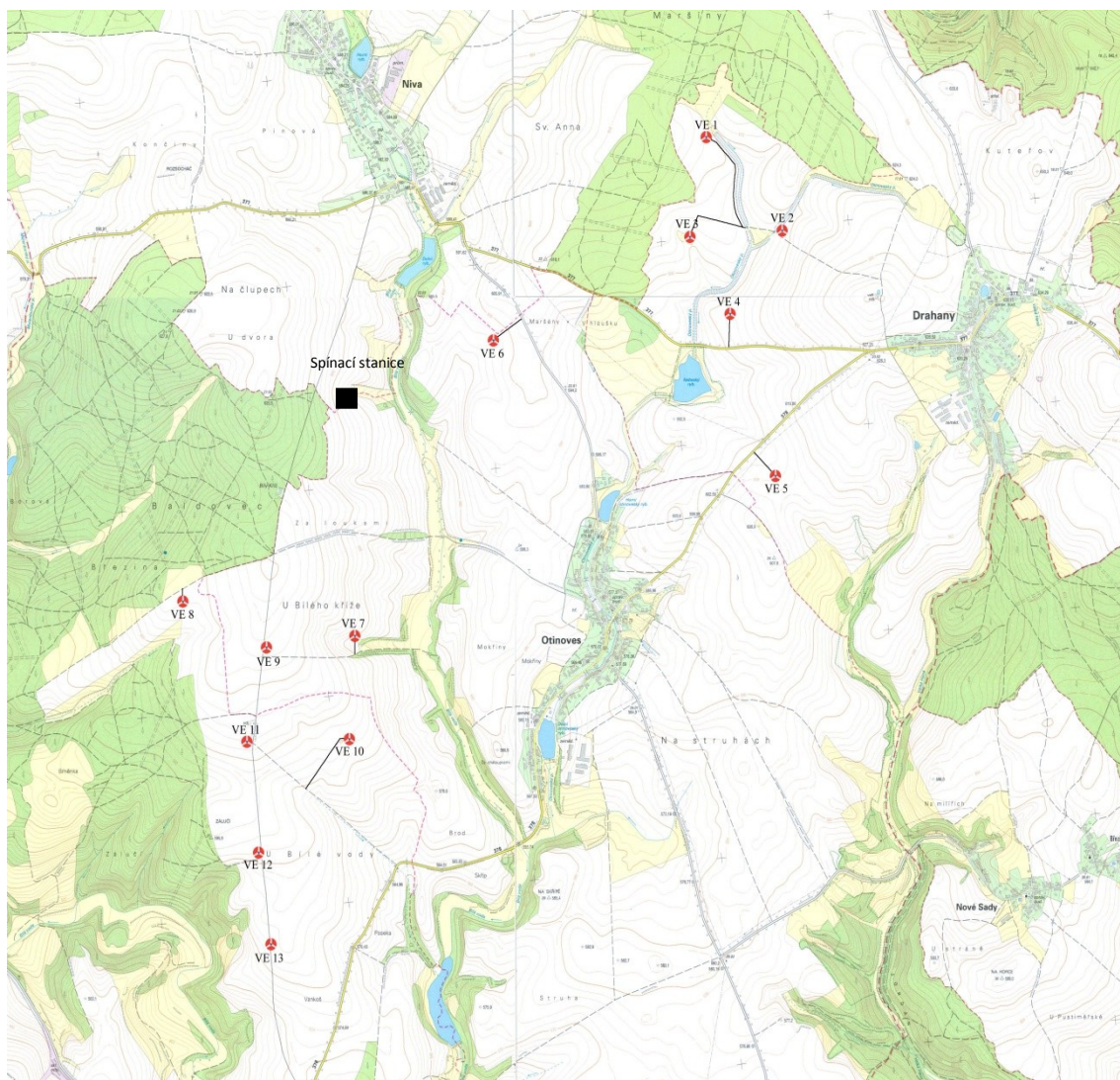
Větrné elektrárny v tomto katastru budou umístěny nad obcí Rozstání v těsné blízkosti lesa Zálučí. Poloha elektráren je volena na základě jednání se zdejší samosprávou tak, aby co nejméně narušovala krajinný ráz, a současně aby byla dodržena minimální vzdálenost 800m od obydlených oblastí a aby bylo dodrženo ochranné pásmo lesa. Důležitá je také vzdálenost mezi instalovanými elektrárnami, která by neměla být menší než pětinasobek průměru jejich rotoru. U VtE Vestas V 112 o průměru rotoru 112m je tedy minimální vzdálenost 560m.



Obr. 27: Katastr obce Rozstání s vyznačením polohy větrných elektráren [18]

Oblast větrného parku

Větrné elektrárny v jednotlivých katastrech jsou umístěny tak, aby tvořily přibližně dva menší větrné parky. Výkon z těchto elektráren bude kabely vyveden do spínací stanice umístěné mezi těmito parky. Spínací stanice bude spojena kabelovým vedením s rozvodnou Boskovic (viz. následující kapitola).



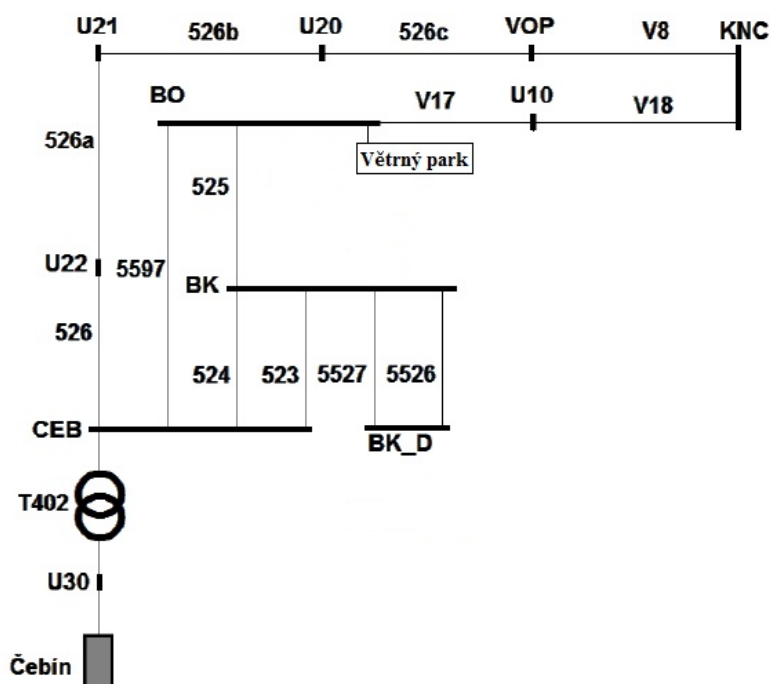
Obr. 27: Celkové uspořádání větrných elektráren [18]

4.2 Oblast rozvodny Boskovice

Vyvedení výkonu větrného parku o instalovaném výkonu 39MW bude provedeno kabelem do rozvodny Boskovice v uzlové oblasti Čebín. Provozovatelem rozvodny je společnost E.ON Distribuce a.s.



Obr. 28: Uzlová oblast Čebín [19]



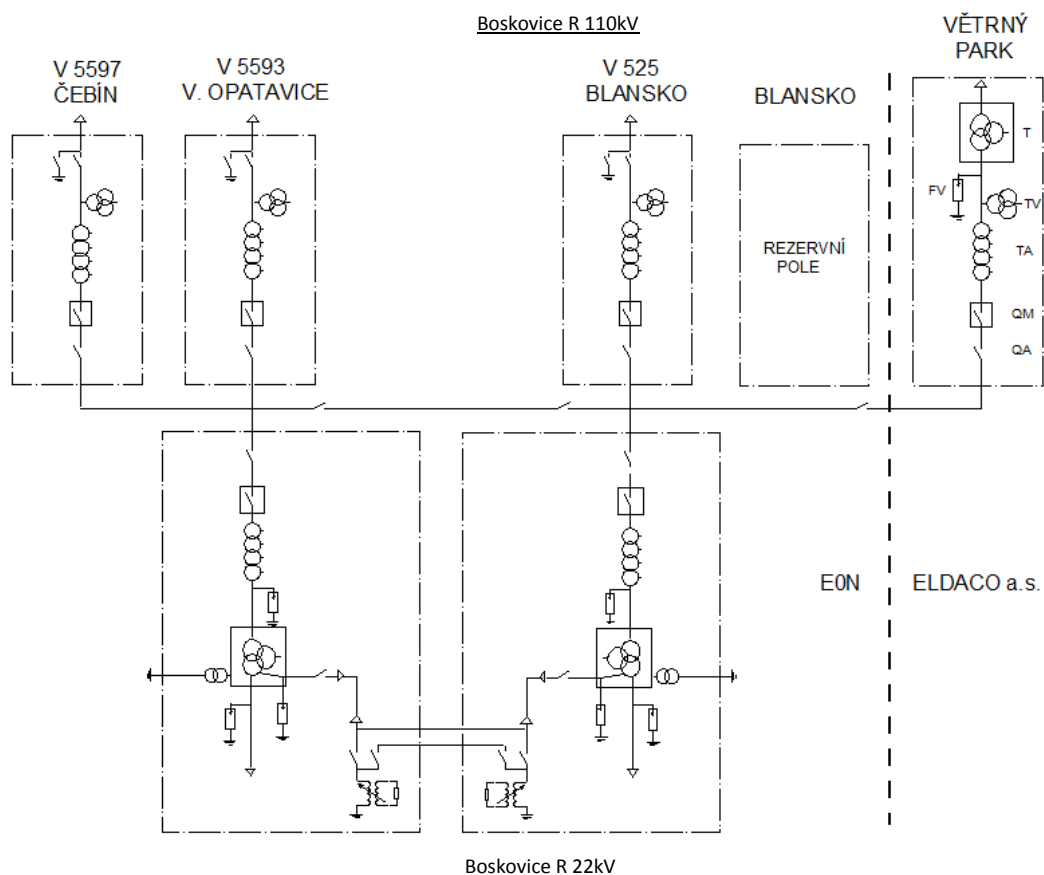
Obr. 29: Schéma distribuční soustavy uzlová oblasti Čebín

Tab. 5: Popis schématu distribuční soustavy uzlové oblasti Čebín

<i>CEB</i>	<i>Čebín</i>	<i>BK D</i>	<i>Blansko ČD</i>
<i>BO</i>	<i>Boskovice</i>	<i>VOP</i>	<i>Velké Opatovice</i>
<i>BK</i>	<i>Blansko</i>	<i>KNC</i>	<i>Konice</i>

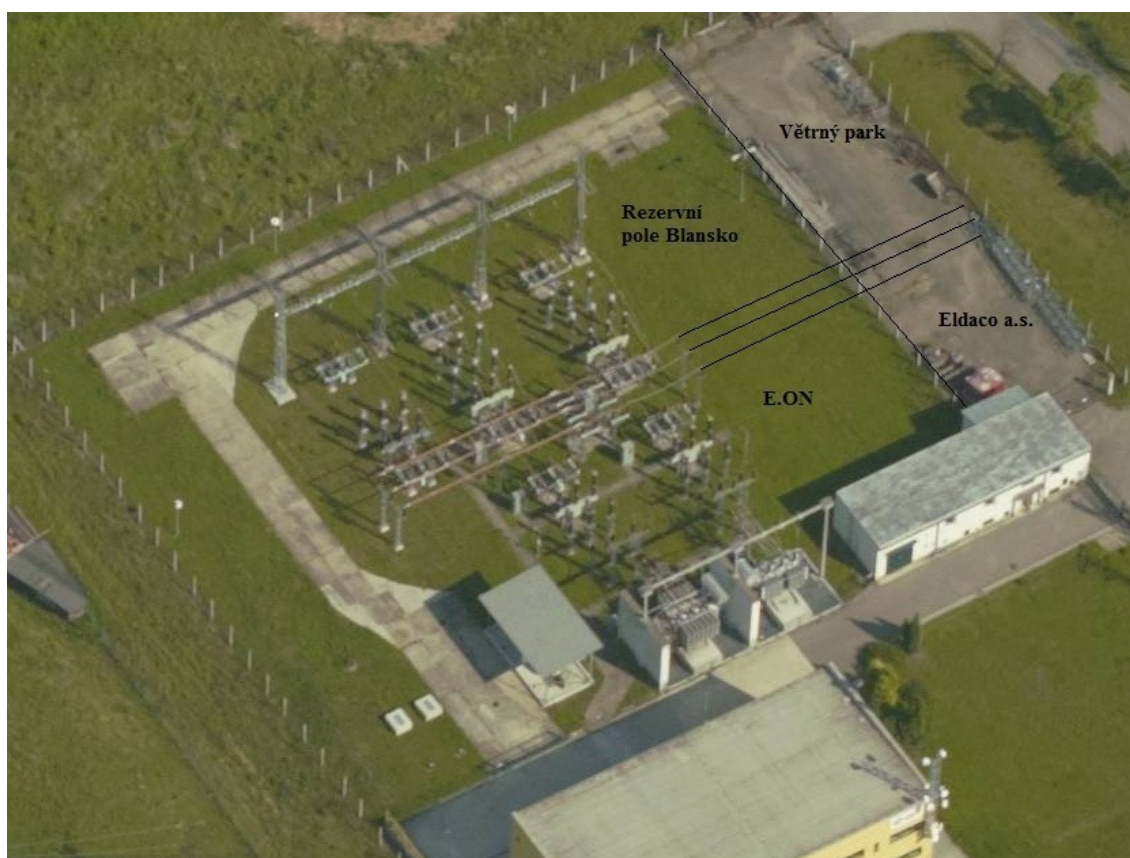
Rozvodna Boskovice je spojena s uzlovou rozvodnou Čebín venkovním vedením 2x110kV (VVN - 5597). Současný stav rozvodny Boskovice je dán stavebními úpravami z roku 2008, kdy v rámci projektu zaústění linky vedení 110kV (VVN – 5593) Boskovice - V. Opatovice – Konice bylo přidáno pole V. Opatovice. Kromě tohoto pole má rozvodna na hladině 110kV ještě pole Čebín a pole Blansko. Další dvě pole slouží pro vyvedení výkonu do napěťové hladiny 22kV (Obr. 30).

E.ON Distribuce, a.s. plánuje do budoucna rozšíření rozvodny o pole Blansko, sloužící ke zdvojení současného vedení 525 a o pole větrný park, které bude určeno pro vyvedení výkonu 13 větrných elektráren společnosti ELDACO a.s.

*Obr. 30: Schéma rozvodny Boskovice s návrhem části ELDACO a.s.*

Tab. 6: Součástky pro pole rozvodny „větrný park“

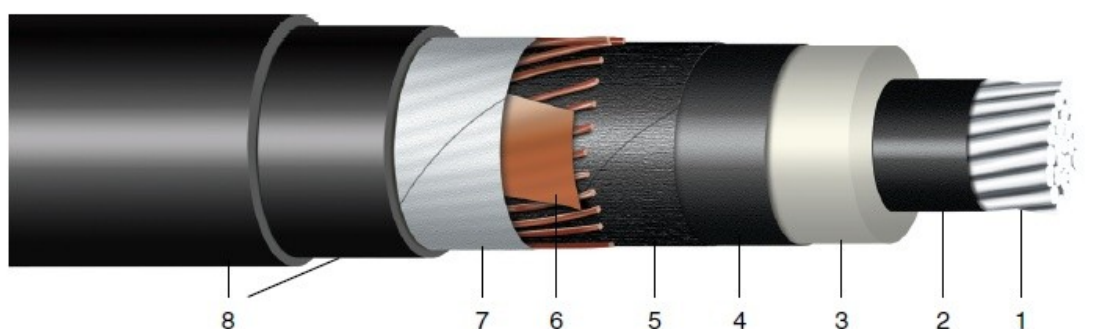
Součástka	Označení	Typ	Parametry	
Transformátor	T	Siemens 110/35	40MVA, 110/35kV	[22]
Svodič přepětí	FV	SBK 120/10.2	120kV, 10kA	[22]
MTU	TV	EOF 145	145kV, 0,3VA	[22]
MTI	TA	JOF 123	123kV, 3kA	[22]
Výkonový vypínač	QM	ADVAC - ABB	123kV, 3,15kA	[23]
Odpojovač	QA	ITD - ABB	0,9kA	[23]

*Obr. 31: Obrázek rozvodny Boskovice s naznačením budoucího rozvoje.*

4.3 Kabel

V projektu budou použity kabely typu 35 – AXEKVCEY (obr. 32). Velikosti průřezů budou určeny s ohledem na úbytky napětí, proudovou zatížitelnost a tepelné účinky při zkratu. Výpočet v následující kapitole.

Konstrukce kabelu: 1 – Hliníkové jádro, 2 – vnitřní polovodivá vrstva, 3 – izolace ze stíněného polyetylenu, 4 – vnější polovodivá vrstva, 5 – polovodivá vodoblokovací páska, 6 – stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky, 7 – vodoblokovací páska, 8 – vnější plášť PE + PVC.

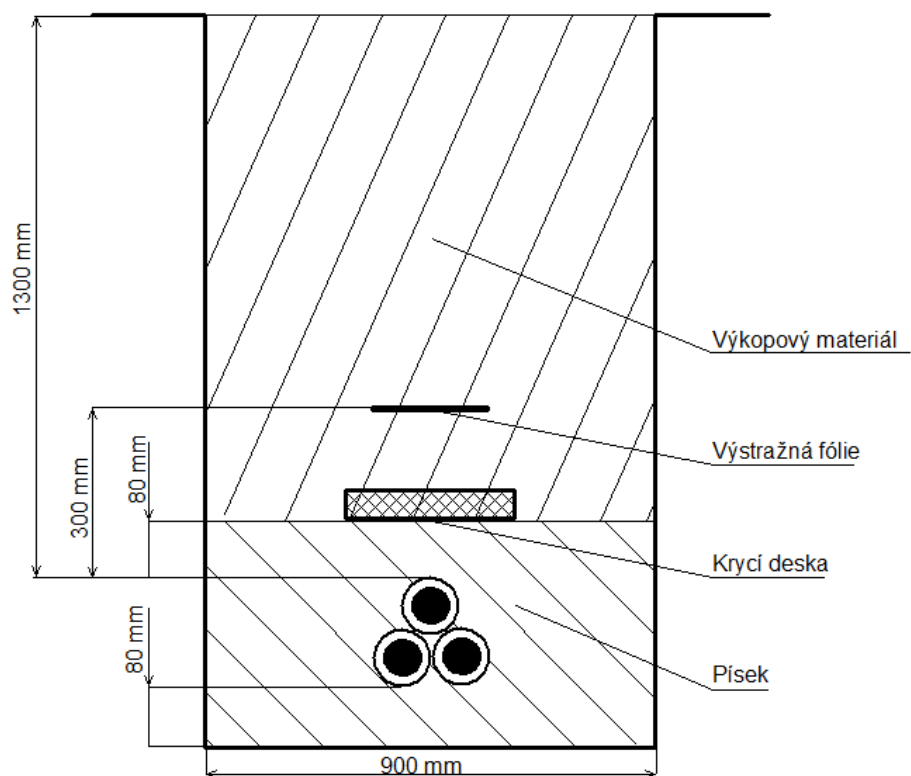


Obr. 32: Kabel AXEKVCEY [21]

Kabely budou v celém projektu uloženy v zemi a vedeny kabelovou rýhou (obr. 33). Uložení kabelů bude provedeno do trojsvazku a uspořádání bude trojúhelníkové. V místech souběžného uložení více trojsvazků bude vzdálenost mezi kabely určena tab. 7.[20]

Tab. 7: Vzdálenost kabelů v zemi vedle sebe [20]

Seskupení kabelů v zemi vedle sebe, nad (pod sebou)	Nejmenší vzdálenost souběžných kabelů (mm)	
	Vnější	Osová
Do 10 kV	100	150
22 a 35 kV	150	200
35 kV do 110 kV	200	300



Obr. 33: Uložení kabelu v zemi (řez kabelové rýhy)[20]

5. Návrh variant technického řešení vyvedení výkonu

Hlavním úkolem diplomové práce je navrhnout varianty technického řešení vyvedení výkonu třinácti větrných elektráren. Navrhl jsem dvě řešení. První počítá s provozováním větrného parku jako paprskové sítě (obr. 34, příloha I.). V druhém řešení by se celý větrný park rozdělil na dvě okružní sítě (obr. 44, příloha II.). V obou případech by byly sítě provozovány na napěťové hladině 35kV a jejich výkon by byl vyveden do spínací stanice umístěné v blízkosti větrného parku (obr. 27). Ze spínací stanice by bylo dále vedeno dvojité kabelové vedení do rozvodny Boskovice, kde by bylo vybudováno nové pole - větrný park (obr. 30).

5.1 Projektování kabelového vedení

5.1.1 Proudové zatížení vodiče

Výpočtový proud, který vychází z maximálního zatížení, se pro trojfázové spotřebiče spočítá podle vztahu[24]:

$$I_P = \frac{P_P}{\sqrt{3} * U_s * \cos\varphi} \quad (A) \quad (5.1)$$

- P_P maximální zatížení
- U_s sdružené napětí
- $\cos\varphi$ účinník

5.1.2 Úbytek napětí na vedení

Návrh vedení musí být proveden tak, aby nedocházelo k úbytkům napětí větším, než je povoleno normou. Mohlo by dojít k ovlivnění důležitých provozních vlastností spotřebičů[24].

Vztah pro úbytek napětí:

$$\Delta U_s = \frac{\sqrt{3} * \rho}{S} * \sum l * I_{\xi} + \sqrt{3} * X_k * \sum l * I_j \quad (V) \quad (5.2)$$

- Δu_{DOV} dovolený úbytek napětí
- I_{ξ} činný proud
- I_j jalový proud
- X_k induktivní reaktance
- ρ měrný elektrický odpor

Ze vzorce pro úbytek můžeme vhodným vyjádřením spočítat také průřez vodiče S .

$$S = \frac{\sqrt{3} * \rho * \sum l * I_{\Sigma}}{\Delta u_{DOV} - \sqrt{3} * X_k * \sum l * I_j} \quad (mm^2) \quad (5.3)$$

Takto spočítaný průřez je ovšem volen pouze s ohledem na dovolený úbytek napětí pro danou napěťovou hladinu. Tento průřez je nutné následně zkontrolovat s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu.

5.1.3 Tepelné účinky zkratových proudů

Při výpočtu postupují podle normy ČSN EN 60909, která je založena na metodě ekvivalentního napěťového zdroje, jenž je jediným zdrojem napětí v soustavě. Všechny ostatní prvky jsou nahrazeny svými vnitřními impedancemi[25]. Důležité vzorce pro výpočet jsou:

Generátor:

$$X_G = \frac{x_d * U_{nG}^2}{100 * S_{nG}} \quad (\Omega) \quad (5.4)$$

Pro generátory $U_{nG} > 1kV$ a $S_{nG} < 100MVA$ platí:

$$R_G = 0,07 * X_G \quad (\Omega) \quad (5.5)$$

$$Z = (R_G + jX_G) \quad (\Omega) \quad (5.6)$$

Korekční součinitel:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} * \frac{c_{max}}{1 + x_d * \sin \varphi_G} \quad (-) \quad (5.7)$$

$-x_d''$	rázová reaktance generátoru
$-U_{nG}$	jmenovité napětí generátoru
$-S_{nG}$	jmenovitý zdánlivý výkon generátoru
$-U_n$	jmenovité sdružené napětí v místě zkratu
$-c_{max}$	napěťový součinitel (volen pro vn 1,1)

Přepočet:

$$Z_G = K_G * ([R_G + jX_G]) \quad (\Omega) \quad (5.8)$$

Trafo:

$$Z_T = \frac{u_k * U_{nT}^2}{100 * S_{nT}} \quad (\Omega) \quad (5.9)$$

$$R_T = P_k * \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}^2} \quad (\Omega) \quad (5.10)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (\Omega) \quad (5.11)$$

$$Z = (R_T + jX_T) \quad (\Omega) \quad (5.12)$$

Korekční součinitel:

$$K_T = 0,95 * \frac{c_{max}}{1 + 0,6 * x_T} \quad (-) \quad (5.13)$$

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}} \quad (-) \quad (5.14)$$

$-u_k$	jmenovité napětí nakrátko
$-U_{nT}$	jmenovité napětí transformátoru
$-S_{nT}$	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
$-P_k$	jmenovitý ztráty nakrátko
$-c_{max}$	napěťový součinitel (volen pro vn 1,1)

$$Z_T = K_T * (R_T + jX_T) \quad (\Omega) \quad (5.15)$$

Kabel:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) \quad (\Omega) \quad (5.16)$$

Přepočet:

Z důvodu výpočtu parametrů jednotlivých prvků ve fyzikálních jednotkách je nutný přepočet na napěťovou hladinu v místě zkratu podle vztahu:

$$Z_2 = Z_1 * \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad (\Omega) \quad (5.17)$$

Počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} \quad (kA) \quad (5.18)$$

$-U_n$ jmenovité sdružené napětí v místě zkratu

$-Z$ výsledná sousledná impedance zkratového obvodu

$-c$ napěťový součinitel (volen pro vn 1,1)

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = k_e * I_{k3}'' \quad (kA) \quad (5.19)$$

Výpočet průřezu:

$$S_{\min} \geq \frac{I_{ke} * \sqrt{t}}{K} \quad (mm^2) \quad (5.20)$$

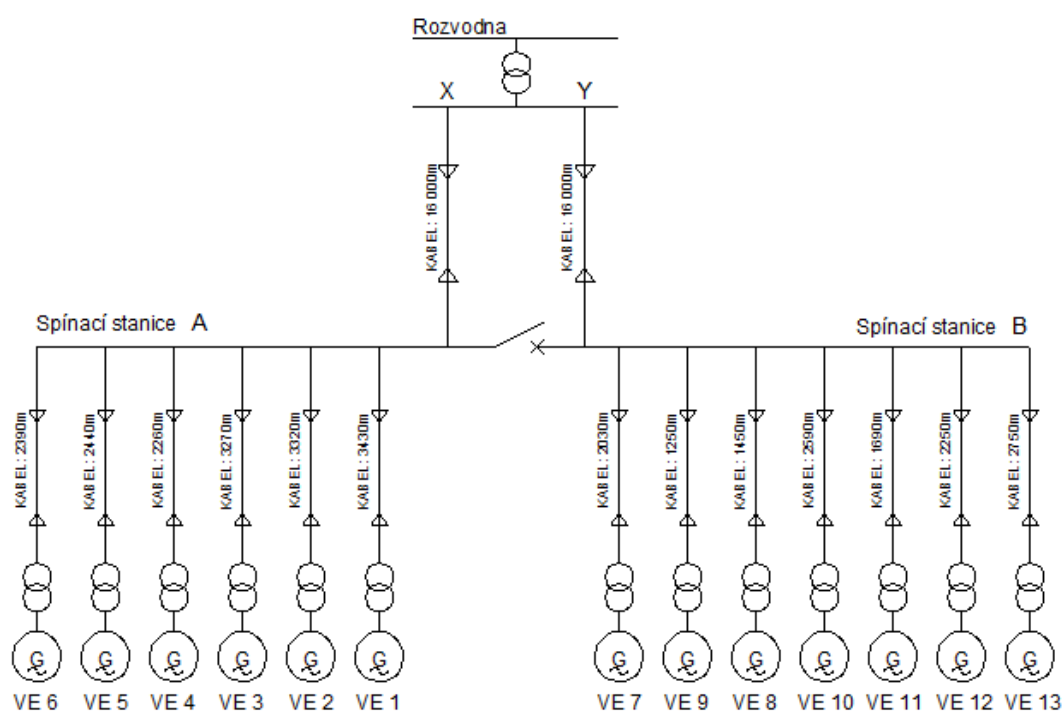
Tab. 8: Součinitel k_e pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu [24]

t		k_e
[s]		[vn, vvn]
	0,05	1,6
0,05	0,1	1,5
0,1	0,2	1,4
0,2	1,0	1,3
1,0	3,0	1,1
3,0		1

Tab. 9: Koefficient K pro dimenzování vedení[24]

Součinitel K	Materiál jádra vodiče			
	Cu		Al	
	Materiál izolace vodiče			
	PVC	Př.ž	PVC	Př.ž
	115	135	74	87

5.2 Paprsková síť

*Obr. 34: Paprskové síť***Tab. 10: Parametry generátoru větrné elektrárny VE1 – VE13**

Jmenovitý činný výkon:	3MW
Typ:	asynchronní
Jmenovité napětí	1000V
Frekvence	50 Hz
Rozsah účinníku:	0,98ind – 0,96kap
Činitel flikru c:	2,04

Tab. 11: Parametry transformátoru větrné elektrárny VE1 - VE13

Jmenovitý výkon:	3,14 MVA
VN:	35 kV
NN:	1 kV
Ztráty nakrátko:	28 kW
Napětí nakrátko	8%

Tab. 12: Parametry transformátoru pro rozvodnu

Jmenovitý výkon:	40 MVA
VVN:	110 kV
VN:	35 kV
Ztráty nakrátko:	86 kW
Napětí nakrátko	11%

5.2.1 Výpočtový proud

Výpočtový proud pro kabel od větrné elektrárny do spínací stanice:

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} * U_s * \cos\varphi} = \frac{3000000}{\sqrt{3} * 35000 * 0,98} = 50,49A$$

$$I_{\xi} = I_p * \cos\varphi = 50,49 * 0,98 = 49,5A$$

$$I_j = I_p * \sin\varphi = 50,49 * 0,19 = 9,6A$$

Výpočtový proud pro kabel X, ze spínací stanice do rozvodny Boskovice:

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} * U_s * \cos\varphi} = \frac{18000000}{\sqrt{3} * 35000 * 0,98} = 302,9A$$

$$I_{\xi} = I_p * \cos\varphi = 319,8 * 0,98 = 296,9A$$

$$I_j = I_p * \sin\varphi = 319,8 * 0,19 = 57,6A$$

Výpočtový proud pro kabel Y, ze spínací stanice do rozvodny Boskovice:

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} * U_s * \cos\varphi} = \frac{21000000}{\sqrt{3} * 35000 * 0,98} = 353,5A$$

$$I_{\xi} = I_p * \cos\varphi = 353,5 * 0,98 = 346,4A$$

$$I_j = I_p * \sin\varphi = 353,5 * 0,19 = 67,2A$$

5.2.2 Výpočet průřezu vodiče

Dovolený úbytek napětí 5% pro napěťovou hladinu 35kV:

$$\Delta u_{DOV} = \frac{5}{100} * 35 * 10^3 = 1750V$$

Velikost průřezu kabelu od větrné elektrárny 1 do spínací stanice:

(Podle následujícího výsledku bude navrženo i zbylých 12 kabelů od VE)

$$S_1 = \frac{\sqrt{3} * \rho * \sum l * I_{\xi}}{\Delta u_{DOV} - \sqrt{3} * X_k * \sum l * I_j} = \frac{1}{33} * \frac{3430 * 49,5}{\frac{1750}{\sqrt{3}} - (0,144 * 10^{-3}) * (3430 * 9,6)} = 5,15mm^2$$

Volím průřez 50 mm² (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 50 mm²)

Velikost průřezu pro kabel X ze spínací stanice do rozvodny Boskovice :

$$S_X = \frac{\sqrt{3} * \rho * \sum l * I_{\xi}}{\Delta u_{DOV} - \sqrt{3} * X_k * \sum l * I_j} = \frac{\frac{1}{33} * 16 * 10^3 * 296,9}{\frac{1750}{\sqrt{3}} - (0,125 * 10^{-3}) * (16 * 10^3 * 57,6)} = 161mm^2$$

Volím průřez 240mm² (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 240 mm²)

Velikost průřezu pro kabel Y ze spínací stanice do rozvodny Boskovice :

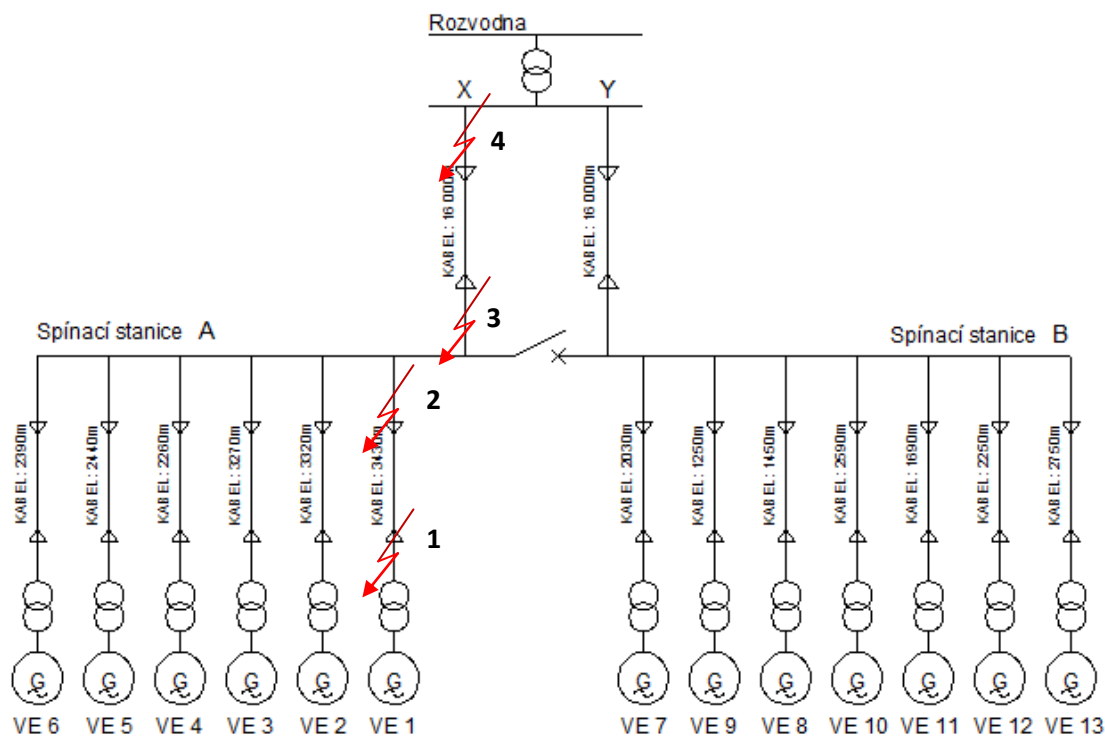
$$S_Y = \frac{\sqrt{3} * \rho * \sum l * I_{\xi}}{\Delta u_{DOV} - \sqrt{3} * X_k * \sum l * I_j} = \frac{\frac{1}{33} * 16 * 10^3 * 346,4}{\frac{1750}{\sqrt{3}} - (0,125 * 10^{-3}) * (16 * 10^3 * 67,2)} = 192mm^2$$

Volím průřez 240mm² (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 240 mm²)

Vypočítané průřezy ověřím s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu.

5.2.3 Dimenzování průřezů vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu

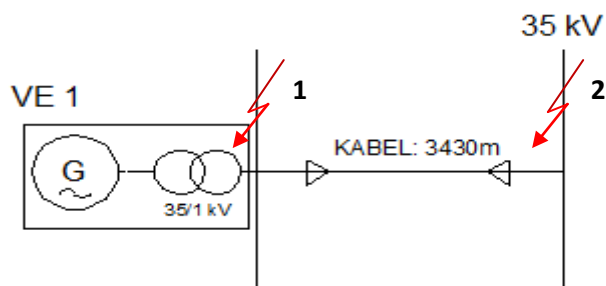
Při výpočtu maximálního zkratového proudu vždy uvažují, že ke zkratu došlo na začátku kabelu ve směru od zdroje.



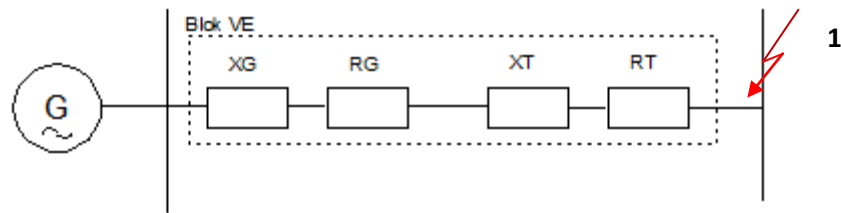
Obr. 35: Paprskové síť s naznačením míst zkratů.

Dimenzování vodiče z větrné elektrárny do spínací stanice

Dimenzování vodiče z větrné elektrárny do spínací stanice bude provedeno u paprsku 1 z důvodu nejdelšího přívodního kabelu. Pro zbylé paprsky budou kabely navrženy podle tohoto výpočtu.



Obr. 36: Paprsek 1 s naznačenými místy zkratu

Zkrat v bodě 1:

Obr. 37: Náhradní schéma pro zkrat v místě 1

Generátor VE:

$$X_G = \frac{x_d * U_{nG}^2}{100 * S_{nG}} = \frac{10,7 * 1000^2}{100 * (3 * 10^6)} = 0,0357 \Omega$$

$$R_G = 0,07 * X_G = 0,07 * 0,0357 = 0,0025 \Omega$$

$$Z = (R_G + jX_G) = (0,0025 + j0,0357) \Omega$$

Korekční součinitel:

$$K_G = \frac{U_n}{U_G} * \frac{c_{max}}{1 + x_d * \sin \varphi_G} = \frac{1000}{1000} * \frac{1,1}{1 + 0,1 * 0,19} = 1,079$$

Přepočet na napěťovou hladinu v místě zkratu:

$$Z_G = K_G * \left(\left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 * [R_G + jX_G] \right) = 1,079 * \left(\left(\frac{35000}{1000} \right)^2 * [0,0025 + j0,0357] \right) \\ = (3,3 + j47,2) \Omega$$

Trafo VE:

$$Z_T = \frac{u_k * U_{nT}^2}{100 * S_{nT}} = \frac{8 * 35000^2}{100 * (3,14 * 10^6)} = 31,21 \Omega$$

$$R_T = P_k * \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}^2} = 28000 * \frac{35000^2}{(3,14 * 10^6)^2} = 3,49 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 31,014 \Omega$$

$$Z = (R_T + jX_T) = (3,49 + j31,014) \Omega$$

Korekční součinitel:

$$K_T = 0,95 * \frac{c_{max}}{1 + 0,6 * x_T} = 0,95 * \frac{1,1}{1 + 0,6 * 0,08} = 0,997$$

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}} = \frac{31,014}{\frac{35000^2}{(3,14 * 10^6)}} = 0,08$$

$$Z_T = K_T * (R_T + jX_T) = 0,997 * (3,49 + j31,014) = (3,49 + j30,9)\Omega$$

Blok větrné elektrárny:

$$Z_{VE} = (Z_G + Z_T) = ((3,3 + j47,2) + (3,49 + j30,9)) = (6,8 + j78)\Omega$$

Celková impedance:

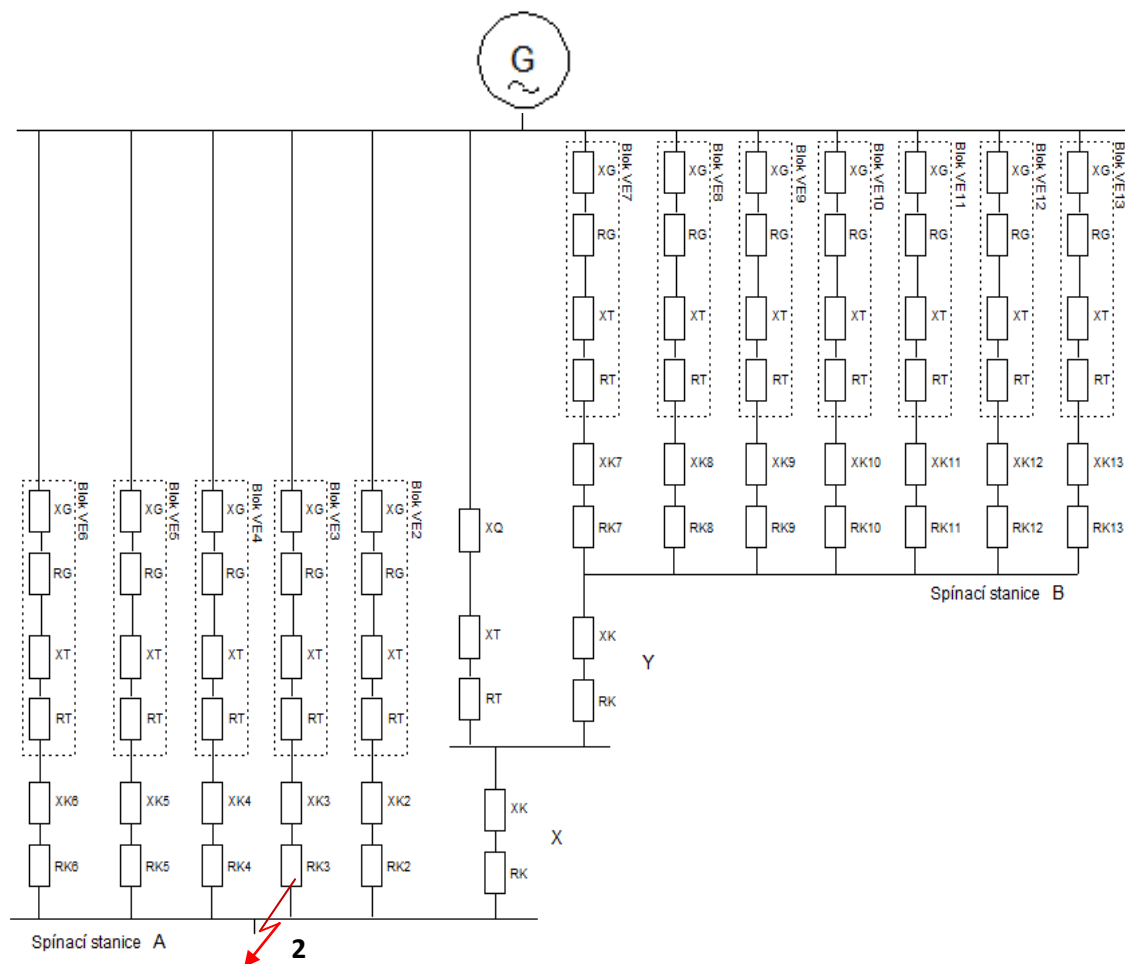
$$Z = Z_{VE} = (6,8 + j78) = 78,3\Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 1:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |78,3|} = 0,28kA$$

Zkrat -bod 2(a):

Při vzniku tohoto zkratu je výkonový vypínač mezi spínací stanicí A i B rozeznut. Výkon ze spínací stanice A je vyváděn přes vodič X a výkon ze spínací stanice B je vyváděn přes vodič Y. Ke zkratu došlo na vývodu spínací stanice A k větrné elektrárně 1.



Obr. 38: Náhradní schéma pro zkrat v místě 2 (a)

Impedance větrné elektrárny VE2 – VE13:

$$Z_{VE} = (Z_G + Z_T) = ((3,3 + j47,2) + (3,49 + j30,9)) = (6,8 + j78) \Omega$$

Kabely k větrným elektrárnám:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 50mm²

Kabel7:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,03 * (0,606 + j0,16) = (1,23 + j0,32)\Omega$$

Kabel8:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,15 * (0,606 + j0,16) = (0,69 + j0,18)\Omega$$

Kabel9:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,45 * (0,606 + j0,16) = (0,879 + j0,232)\Omega$$

Kabel10:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,6 * (0,606 + j0,16) = (1,57 + j0,42)\Omega$$

Kabel11:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,69 * (0,606 + j0,16) = (1,02 + j0,27)\Omega$$

Kabel12:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,25 * (0,606 + j0,16) = (1,36 + j0,36)\Omega$$

Kabel13:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,75 * (0,606 + j0,16) = (1,66 + j0,44)\Omega$$

Kabel2:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 3,32 * (0,606 + j0,16) = (2,01 + j0,53)\Omega$$

Kabel3:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 3,27 * (0,606 + j0,16) = (1,98 + j0,52)\Omega$$

Kabel4:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,26 * (0,606 + j0,16) = (1,37 + j0,36)\Omega$$

Kabel5:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,44 * (0,606 + j0,16) = (1,47 + j0,39)\Omega$$

Kabel6:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,39 * (0,606 + j0,16) = (1,44 + j0,38)\Omega$$

Kabel X = kabel Y:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 240mm²

$$Z_{kX} = Z_{kY} = l * (R_K + jX_K) = 16 * (0,126 + j0,125) = (2,016 + j2)\Omega$$

Síťový napáječ:

$$Z = \frac{c * U_{nQ}^2}{S_k} * \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = \frac{1,1 * 110\,000^2}{15481 * 10^6} * \left(\frac{35000}{110000}\right)^2 = 0,087\Omega$$

$$X_Q = 0,995 * Z_Q = 0,087\Omega$$

$$R_Q = 0,1 * X_Q = 0,0087\Omega$$

$$Z_Q = (R_Q + jX_Q) = (0,0087 + j0,087)\Omega$$

Trafo rozvodny:

$$Z = \frac{u_k * U_{nT}^2}{100 * S_{nT}} = \frac{11 * 35000^2}{100 * (40 * 10^6)} = 3,37\Omega$$

$$R_T = P_k * \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}^2} = 86000 * \frac{35000^2}{(40 * 10^6)^2} = 0,066\Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 3,37\Omega$$

$$Z = (R_T + jX_T) = (0,066 + j3,37)\Omega$$

Korekční součinitel:

$$K_T = 0,95 * \frac{c_{max}}{1 + 0,6 * x_T} = 0,95 * \frac{1,1}{1 + 0,6 * 0,11} = 0,98$$

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}} = \frac{3,37}{\frac{35000^2}{(40 * 10^6)}} = 0,11$$

$$Z_T = K_T * (R_T + jX_T) = 0,98 * (0,066 + j3,37) = (0,064 + j3,3)\Omega$$

Výpočet:

1) Určím impedanci větrného parku vyvedeného do spínací stanice B:

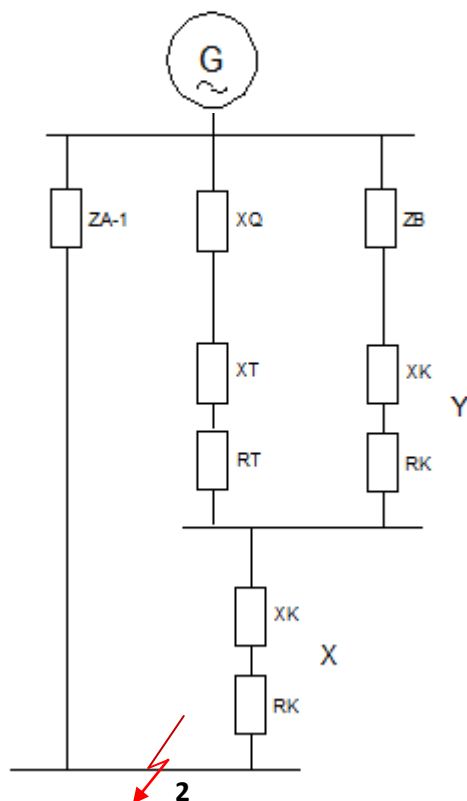
$$Z_B = \frac{1}{\frac{1}{Z_{VE7} + Z_{K7}} + \frac{1}{Z_{VE8} + Z_{K8}} + \frac{1}{Z_{VE9} + Z_{K9}} + \frac{1}{Z_{VE10} + Z_{K10}} + \frac{1}{Z_{VE11} + Z_{K11}} + \frac{1}{Z_{VE12} + Z_{K12}} + \frac{1}{Z_{VE13} + Z_{K13}}}$$

$$Z_B = (1,14 + j11,18) = 11,25\Omega$$

2) Určím impedanci větrného parku vyvedeného do spínací stanice A bez parsku 1 na kterém vznikl zkrat:

$$Z_{A-1} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{VE2} + Z_{K2}} + \frac{1}{Z_{VE3} + Z_{K3}} + \frac{1}{Z_{VE4} + Z_{K4}} + \frac{1}{Z_{VE5} + Z_{K5}} + \frac{1}{Z_{VE6} + Z_{K6}}}$$

$$Z_{A-1} = (1,31 + j13) = 13\Omega$$



Obr. 39: Náhradní zjednodušené schéma pro zkrat v místě 2 (a)

3) Sériovým a paralelním řazením jednotlivých impedancí určím výslednou impedanci

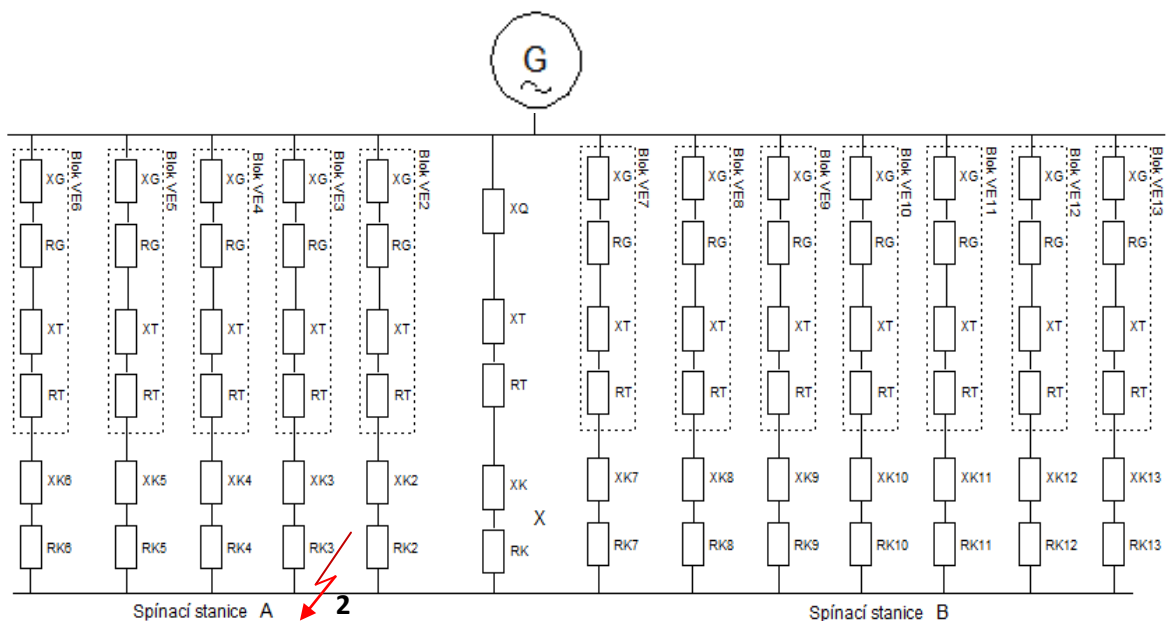
$$Z = \left[\left(\frac{(Z_Q + Z_T) * (Z_B + Z_{kY})}{(Z_Q + Z_T) + (Z_B + Z_{kY})} + Z_{kX} \right) // Z_{A-1} \right] = (1,32 + j3,47) = 3,71 \Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2 (a):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |3,71|} = 5,99 kA$$

Zkrat - bod 2(b)

Při vzniku tohoto zkratu je výkonový vypínač mezi spínací stanicí A i B sepnut. Výkon ze spínací stanice A i B je vyváděn pouze přes vodič X (na vodiči Y došlo k poruše). Ke zkratu došlo na vývodu ze spínací stanice A k větrné elektrárně 1.



Obr. 40: Náhradní schéma pro zkrat v místě 2 (b)

Impedance větrné elektrárny VE2 – VE13:

$$Z_{VE} = (Z_G + Z_T) = ((3,3 + j47,2) + (3,49 + j30,9)) = (6,8 + j78) \Omega$$

Kabely k větrným elektrárnám:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 50mm²

Kabel7:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,03 * (0,606 + j0,16) = (1,23 + j0,32)\Omega$$

Kabel8:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,15 * (0,606 + j0,16) = (0,69 + j0,18)\Omega$$

Kabel9:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,45 * (0,606 + j0,16) = (0,879 + j0,232)\Omega$$

Kabel10:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,6 * (0,606 + j0,16) = (1,57 + j0,42)\Omega$$

Kabel11:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,69 * (0,606 + j0,16) = (1,02 + j0,27)\Omega$$

Kabel12:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,25 * (0,606 + j0,16) = (1,36 + j0,36)\Omega$$

Kabel13:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,75 * (0,606 + j0,16) = (1,66 + j0,44)\Omega$$

Kabel2:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 3,32 * (0,606 + j0,16) = (2,01 + j0,53)\Omega$$

Kabel3:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 3,27 * (0,606 + j0,16) = (1,98 + j0,52)\Omega$$

Kabel4:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,26 * (0,606 + j0,16) = (1,37 + j0,36)\Omega$$

Kabel5:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,44 * (0,606 + j0,16) = (1,47 + j0,39)\Omega$$

Kabel6:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,39 * (0,606 + j0,16) = (1,44 + j0,38)\Omega$$

Kabel X:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 240mm²

$$Z_{kX} = l * (R_K + jX_K) = 16 * (0,126 + j0,125) = (2,016 + j2)\Omega$$

Síťový napáječ:

$$Z = \frac{c * U_{nQ}^2}{S_k} * \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = \frac{1,1 * 110\,000^2}{15481 * 10^6} * \left(\frac{35000}{110000}\right)^2 = 0,087\Omega$$

$$X_Q = 0,995 * Z_Q = 0,087\Omega$$

$$R_Q = 0,1 * X_Q = 0,0087\Omega$$

$$Z_Q = (R_Q + jX_Q) = (0,0087 + j0,087)\Omega$$

Trafo rozvodny:

$$Z = \frac{u_k * U_{nT}^2}{100 * S_{nT}} = \frac{11 * 35000^2}{100 * (40 * 10^6)} = 3,37\Omega$$

$$R_T = P_k * \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}^2} = 86000 * \frac{35000^2}{(40 * 10^6)^2} = 0,066\Omega$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 3,37\Omega$$

$$Z = (R_T + jX_T) = (0,066 + j3,37)\Omega$$

Korekční součinitel:

$$K_T = 0,95 * \frac{c_{max}}{1 + 0,6 * x_T} = 0,95 * \frac{1,1}{1 + 0,6 * 0,11} = 0,98$$

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{nT}^2}{S_{nT}}} = \frac{3,37}{\frac{35000^2}{(40 * 10^6)}} = 0,11$$

$$Z_T = K_T * (R_T + jX_T) = 0,98 * (0,066 + j3,37) = (0,064 + j3,3)\Omega$$

Výpočet:

1) Určím impedanci větrného parku vyvedeného do spínací stanice B:

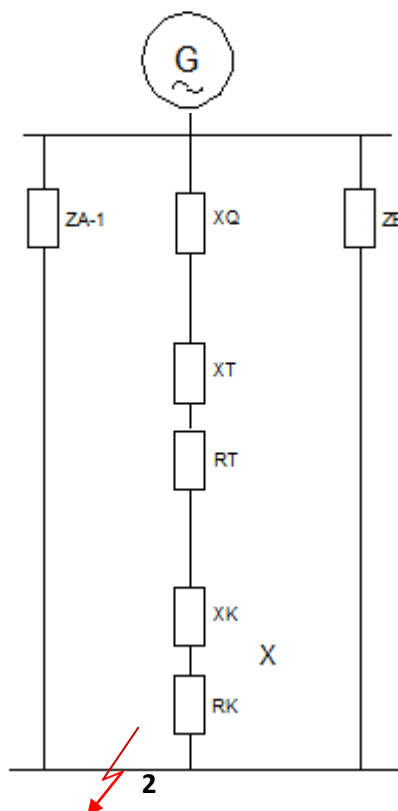
$$Z_B = \frac{1}{\frac{1}{Z_{VE7} + Z_{K7}} + \frac{1}{Z_{VE8} + Z_{K8}} + \frac{1}{Z_{VE9} + Z_{K9}} + \frac{1}{Z_{VE10} + Z_{K10}} + \frac{1}{Z_{VE11} + Z_{K11}} + \frac{1}{Z_{VE12} + Z_{K12}} + \frac{1}{Z_{VE13} + Z_{K13}}}$$

$$Z_B = (1,14 + j11,18) = 11,25\Omega$$

2) Určím impedanci větrného parku vyvedeného do spínací stanice A, bez parsku 1 na kterém vznikl zkrat:

$$Z_{A-1} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{VE2} + Z_{K2}} + \frac{1}{Z_{VE3} + Z_{K3}} + \frac{1}{Z_{VE4} + Z_{K4}} + \frac{1}{Z_{VE5} + Z_{K5}} + \frac{1}{Z_{VE6} + Z_{K6}}}$$

$$Z_{A-1} = (1,31 + j13) = 13\Omega$$



Obr. 41: Náhradní zjednodušené schéma pro zkrat v místě 2 (b)

3) Sériovým a paralelním řazením jednotlivých impedancí určím výslednou impedanci

$$Z = \left[\frac{(Z_Q + Z_T + Z_{kX}) * (Z_B)}{(Z_Q + Z_T + Z_{kX}) + (Z_B)} \right] // Z_{A-1} = (0,7 + j3) = 3,1\Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2 (b):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |3,1|} = 7,1kA$$

Kontrola průřezů vodičů dle tepelných účinků zkratového proudu:

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2 (b):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |3,1|} = 7,1kA$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2 (a):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |3,71|} = 5,99kA$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 1:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |78,3|} = 0,28kA$$

Dále už jen výpočet pro zkrat v bodě 2 (b):

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = k_e * I_{k3}'' = 1,3 * 7,1 = 9,23kA$$

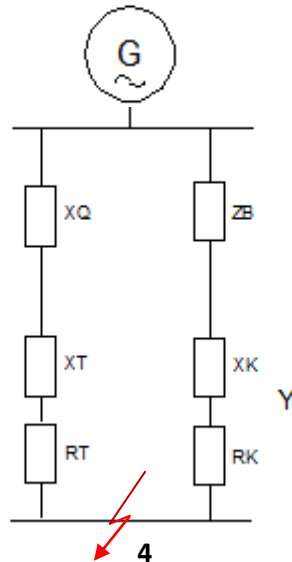
Výpočet průřezu:

$$S_{\min} \geq \frac{I_{ke} * \sqrt{t}}{K} = \frac{9230 * \sqrt{1}}{74} = 122mm^2$$

S ohledem na úbytek napětí jsem volil průřez 50mm². Tento průřez je ale z hlediska zkratů zcela nevyhovující. Volím proto průřez 120mm². (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 120 mm²)

Dimenzování vodiče ze spínací stanice do rozvodny

Při dimenzování kabelu budu uvažovat o nejhorší možné variantě, při které by mohlo dojít ke zkratu.

Zkrat - bod 4

Obr. 42: Náhradní schéma pro zkrat v místě 4

Impedance větrného parku B:

$$Z_B = (1,14 + j11,18) = 11,25\Omega$$

Kabel Y:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 240mm²

$$Z_{kY} = l * (R_K + jX_K) = 16 * (0,126 + j0,125) = (2,016 + j2)\Omega$$

Síťový napáječ:

$$Z_Q = (R_Q + jX_Q) = (0,0087 + j0,087)\Omega$$

Trafo rozvodny:

$$Z_T = K_T * (R_T + jX_T) = 0,98 * (0,066 + j3,37) = (0,064 + j3,3)\Omega$$

Výpočet:

$$Z = \left(\frac{(Z_Q + Z_T) * (Z_B + Z_{kY})}{(Z_Q + Z_T) + (Z_B + Z_{kY})} \right) = (0,12 + j4,15) = 4,16\Omega$$

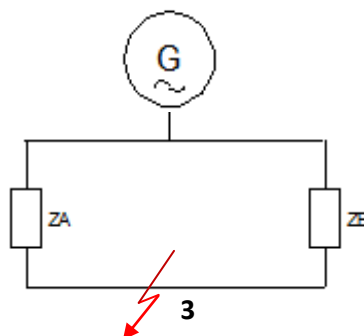
Počáteční rázový zkratový proud - bod 4:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |4,16|} = 5,34 kA$$

Zkrat v bodě 3

Uvažuji, že výkon celého větrného parku je při vzniku zkratu vyváděn pouze přes vodič

X.



Obr. 43: Náhradní schéma pro zkrat v místě 3

Impedance větrného parku B:

$$Z_B = (1,14 + j11,18) = 11,25\Omega$$

Impedance větrného parku A:

$$Z_A = (1,15 + j11,19) = 11,26\Omega$$

Výpočet:

$$Z = \left(\frac{(Z_A) * (Z_B)}{(Z_A) + (Z_B)} \right) = (0,57 + j5,6) = 5,63\Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 3:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |5,63|} = 3,95kA$$

Kontrola průřezů vodičů dle tepelných účinků zkratového proudu:

Počáteční rázový zkratový proud - bod 4:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |4,16|} = 5,34kA$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 3:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |5,63|} = 3,95kA$$

Dále už jen výpočet pro zkrat v bodě 4

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = k_e * I_{k3}'' = 1,3 * 5,34 = 6,94kA$$

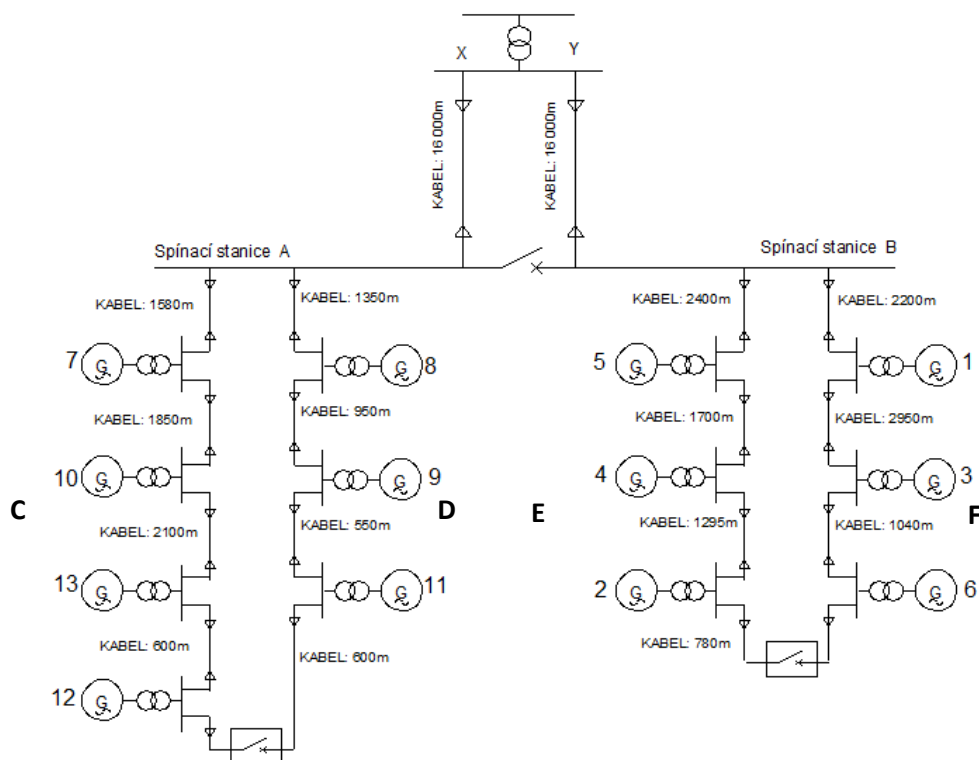
Výpočet průřezu:

$$S_{min} \geq \frac{I_{ke} * \sqrt{t}}{K} = \frac{6940 * \sqrt{1}}{74} = 93,8mm^2$$

S ohledem na úbytek napětí jsem volil průřez 240mm². Tento průřez vyhovuje i s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu. (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 240 mm²)

5.3 Okružní síť

Při výpočtu maximálního zkratového proudu vždy uvažují, že ke zkratu došlo na začátku kabelu ve směru od zdroje.



Obr. 44: Okružní síť

Tab. 13: Parametry generátoru větrné elektrárny VE1 – VE13

Jmenovitý činný výkon:	3MW
Typ:	asynchronní
Jmenovité napětí	1000V
Jmenovitý účinník generátoru ($\cos\varphi$)	1
Frekvence	50 Hz
Rozsah účiníku:	0,98ind – 0,96kap
Činitel flikru c:	2,04

Tab. 14: Parametry transformátoru větrné elektrárny VE1 - VE13

Jmenovitý výkon:	3,14 MVA
VN:	35 kV
NN:	1 kV
Ztráty nakrátko:	28 kW
Napětí nakrátko	8%

Tab. 15: Parametry transformátoru pro rozvodnu

Jmenovitý výkon:	40 MVA
VVN:	110 kV
VN:	35 kV
Ztráty nakrátko:	90 kW
Napětí nakrátko	11%

5.3.1 Výpočtový proud

Výpočtový proud od každé elektrárny pro návrh okružní sítě:

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} * U_s * \cos\varphi} = \frac{3000000}{\sqrt{3} * 35000 * 0,98} = 50,49A$$

$$I_\xi = I_p * \cos\varphi = 50,49 * 0,98 = 49,5A$$

$$I_j = I_p * \sin\varphi = 50,49 * 0,19 = 9,6A$$

5.3.2 Výpočet průřezu vodiče

Dovolený úbytek napětí 5% pro napěťovou hladinu 35kV:

$$\Delta u_{DOV} = \frac{5}{100} * 35 * 10^3 = 1750V$$

Velikost průřezu kabelu okružní sítě CD

Okružní sítě CD i EF budou provozovány v rozpojeném stavu jako čtyři paprsky C, D, E a F. Pro výpočet průřezu budu ovšem počítat s nejhorší možností, že parsy budou sepnuty a bude nutné přenést celý výkon parsku D přes parsek C, nebo celý výkon parsku E přes parsek F.

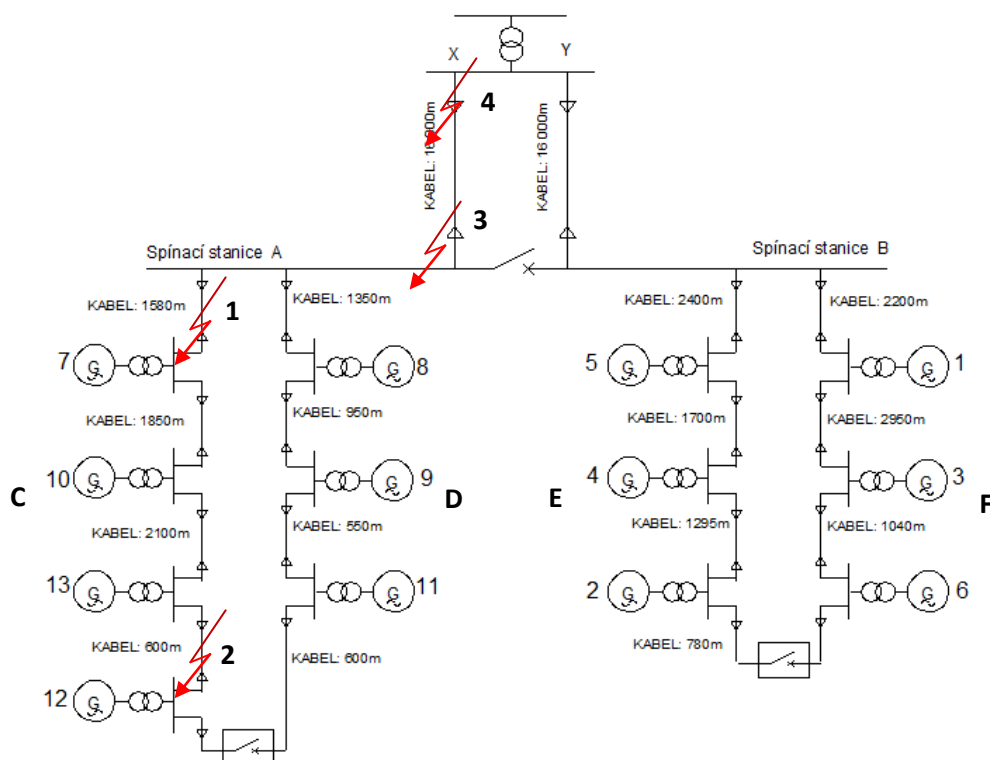
$$S_{CD} = \frac{\sqrt{3} * \rho * \sum l * I_\xi}{\Delta u_{DOV} - \sqrt{3} * X_k * \sum l * I_j} = \frac{\frac{1}{33} * (4187500)}{\frac{1750}{\sqrt{3}} - (0,144 * 10^{-3}) * (80400)} = 141mm^2$$

Volím průřez 150mm² (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 150 mm²)

Průřez pro okružní síť EF bude volen podle okružní sítě CD.

Oba vypočítané průřezy ověřím s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu.

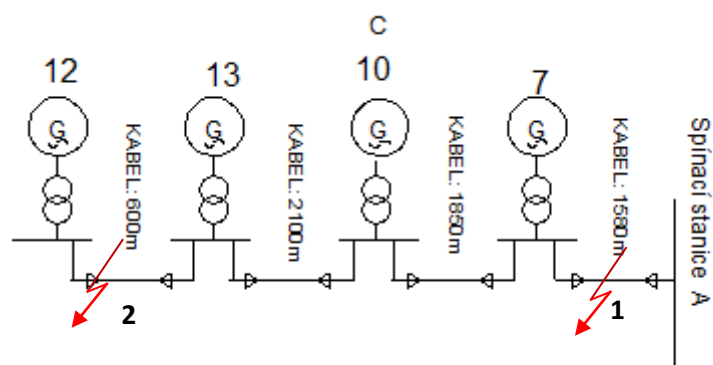
5.3.3 Dimenzování průřezu vodiče dle tepelných účinků zkratového proudu



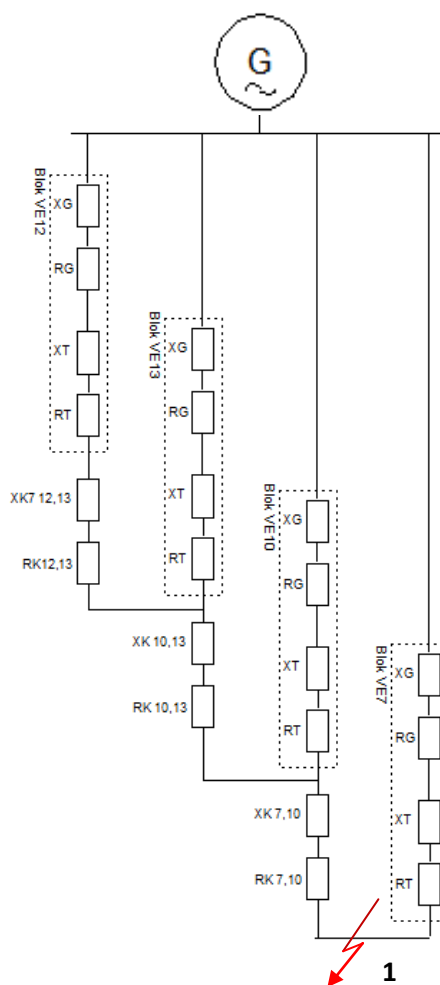
Obr. 45: Okružní síť s naznačením míst zkratů.

Dimenzování vodičů v paprsku C

Okružní síť budou provozovány jako paprskové a budu uvažovat, že zkrat vznikne vždy na začátku kabelu ve směru od zdroje. Průřezy kabelů vypočtené pro paprsek C budou použity i pro ostatní paprsky (D, E, F).



Obr. 46: Paprsek C s naznačenými místy zkratů

Zkrat v bodě 1:

Obr. 47: Náhradní schéma pro zkrat v místě 1

Bloky větrných elektráren:

$$Z_{VE} = (Z_G + Z_T) = ((3,3 + 47,2j) + (3,49 + j30,9)) = (6,8 + j78) \Omega$$

Kabely:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 150mm²

Kabel 7,10:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,9 * (0,253 + j0,138) = (0,45 + j0,26) \Omega$$

Kabel 10,13:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,1 * (0,253 + j0,138) = (0,49 + j0,29) \Omega$$

Kabel 12,13:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 0,6 * (0,253 + j0,138) = (0,141 + j0,083) \Omega$$

Výpočet:

Sériovým a paralelním spojováním jednotlivých hodnot impedancí kabelů a bloků elektráren získám výslednou impedanci paprsku.

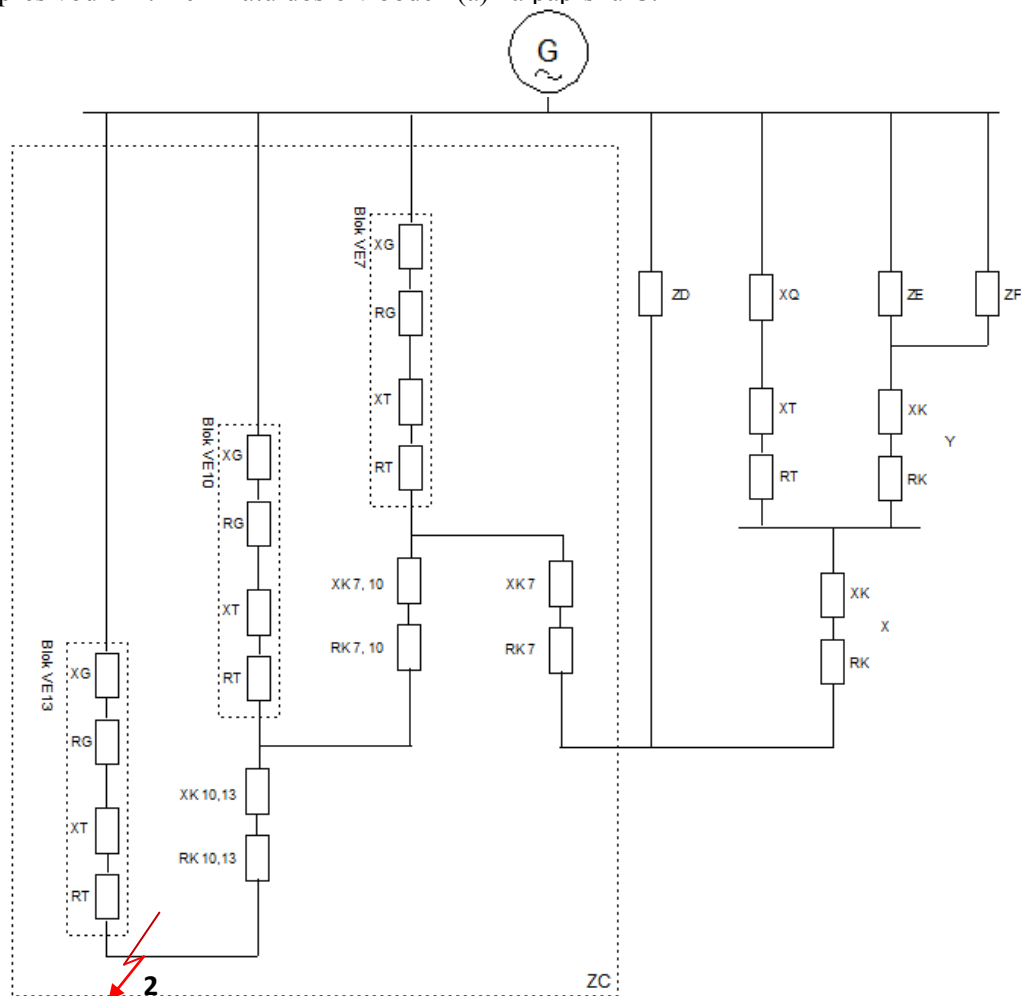
$$Z = (2,08 + j19,23) = 19,34\Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 1:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |19,34|} = 1,15kA$$

Zkrat - bod 2(a)

Při vzniku tohoto zkratu je výkonový vypínač mezi spínací stanicí A i B rozepnut. Výkon ze spínací stanice A je vyváděn přes vodič X a výkon ze spínací stanice B je vyváděn přes vodič Y. Ke zkratu došlo v bodě 2(a) na paprsku C.



Obr. 48: Náhradní schéma pro zkrat v místě 2 (a)

Impedance paprsku F:

$$Z_F = (3,18 + j26,7) = 26,7\Omega$$

Impedance paprsku E:

$$Z_E = (3,1 + j26,46) = 26,6\Omega$$

Impedance paprsku D:

$$Z_D = (2,69 + j26,25) = 26,4\Omega$$

Kabel X = kabel Y:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 240mm²

$$Z_{kX} = Z_{kY} = l * (R_K + jX_K) = 16 * (0,126 + j0,125) = (2,016 + j2)\Omega$$

Síťový napáječ:

$$Z_Q = (R_Q + jX_Q) = (0,0087 + j0,087)\Omega$$

Trafo rozvodny:

$$Z_T = 0,98 * (R_T + jX_T) = 0,98 * (0,066 + j3,37) = (0,064 + j3,3)\Omega$$

Bloky větrných elektráren:

$$Z_{VE} = (Z_G + Z_T) = ((3,3 + j47,2) + (3,49 + j30,9)) = (6,8 + j78)\Omega$$

Kabely v paprsku C:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 150mm²

Kabel 7:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,6 * (0,253 + 0,138j) = (0,38 + 0,22j)\Omega$$

Kabel 7,10:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,9 * (0,253 + 0,138j) = (0,45 + 0,26j)\Omega$$

Kabel 10,13:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,1 * (0,253 + 0,138j) = (0,49 + 0,29j)\Omega$$

Impedance parsku C:

$$Z_C = (1,96 + j18,8) = 18,9\Omega$$

Výpočet:

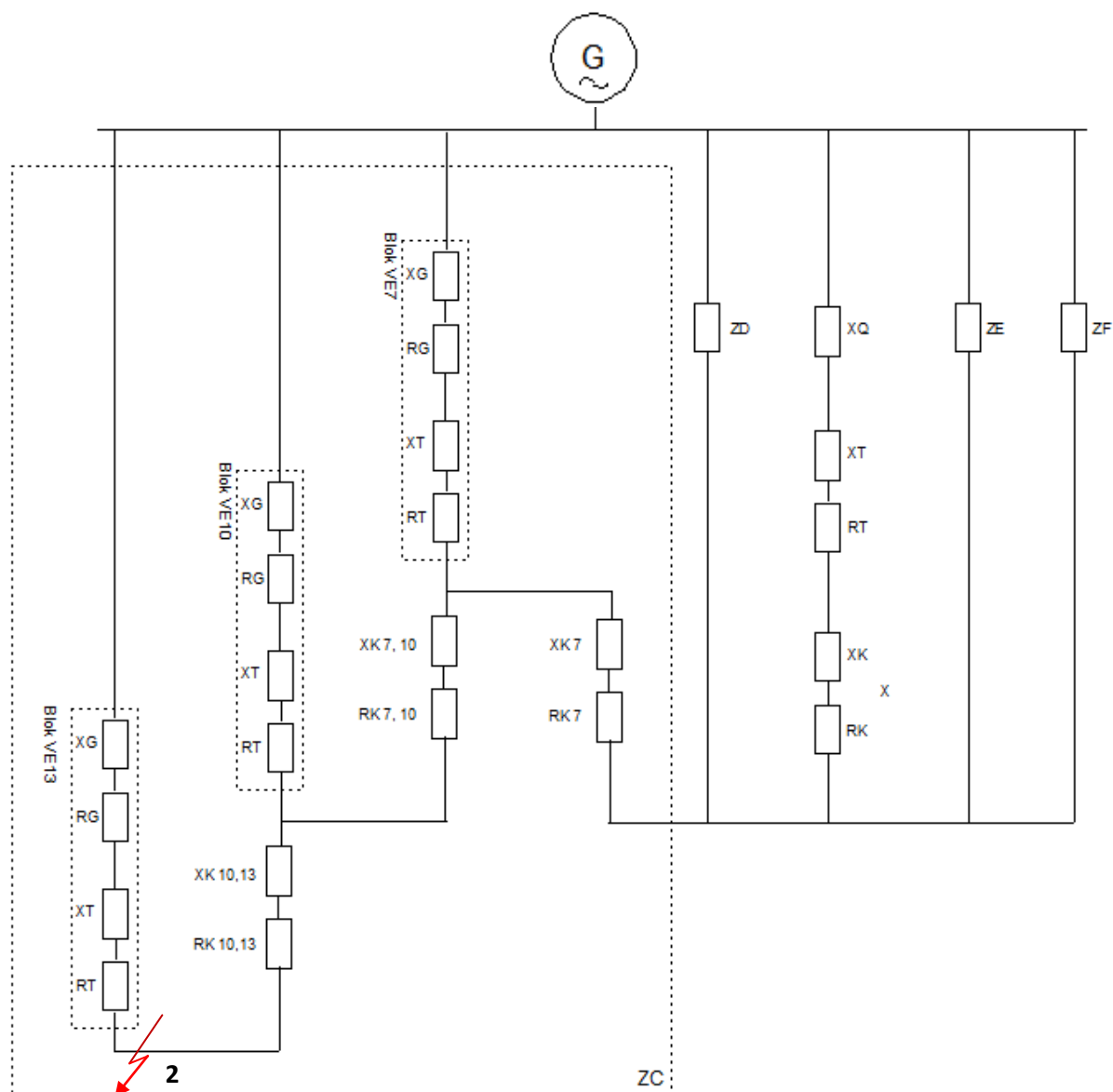
$$Z = (1,59 + j3,4) = 3,59\Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2 (a):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |3,59|} = 6,19 kA$$

Zkrat - bod 2 (b)

Při vzniku tohoto zkratu je výkonový vypínač mezi spínací stanicí A i B sepnut. Výkon ze spínací stanice A i B je vyváděn pouze přes vodič X (na vodiči Y došlo k poruše). Ke zkratu došlo v bodě 2(b) na paprsku C.



Obr. 49: Náhradní schéma pro zkrat v místě 2 (b)

Impedance paprsku F:

$$Z_F = (3,18 + j26,7) = 26,7\Omega$$

Impedance paprsku E:

$$Z_E = (3,1 + j26,46) = 26,6\Omega$$

Impedance paprsku D:

$$Z_D = (2,69 + j26,25) = 26,4\Omega$$

Kabel X:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 240mm²

$$Z_{kX} = l * (R_K + jX_K) = 16 * (0,126 + j0,125) = (2,016 + j2)\Omega$$

Síťový napáječ:

$$Z_Q = (R_Q + jX_Q) = (0,0087 + j0,087)\Omega$$

Trafo rozvodny:

$$Z_T = 0,98 * (R_T + jX_T) = 0,98 * (0,066 + j3,37) = (0,064 + j3,3)\Omega$$

Bloky větrných elektráren:

$$Z_{VE} = (Z_G + Z_T) = ((3,3 + j47,2) + (3,49 + j30,9)) = (6,8 + j78)\Omega$$

Kabely v paprsku C:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 150mm²

Kabel7:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,6 * (0,253 + j0,138) = (0,38 + j0,22)\Omega$$

Kabel 7,10:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 1,9 * (0,253 + j0,138) = (0,45 + j0,26)\Omega$$

Kabel 10,13:

$$Z_k = l * (R_K + jX_K) = 2,1 * (0,253 + j0,138) = (0,49 + j0,29)\Omega$$

Impedance parsu C:

$$Z_C = (1,96 + j18,8) = 18,9\Omega$$

Výpočet:

$$Z = (0,77 + j2,89) = 2,99\Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2 (b):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |2,99|} = 7,43kA$$

Kontrola průřezů vodičů dle tepelných účinků zkratového proudu:

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2 (b):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |2,99|} = 7,43kA$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 2(a):

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |3,59|} = 6,19kA$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 1:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |19,34|} = 1,15kA$$

Dále už jen výpočet pro zkrat v bodě 2 (b):

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = k_e * I_{k3}'' = 1,3 * 7,43 = 9,66kA$$

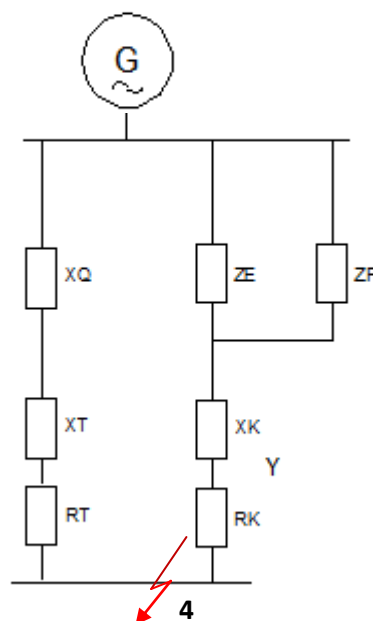
Výpočet průřezu:

$$S_{\min} \geq \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t}}{K} = \frac{9660 \cdot \sqrt{1}}{74} = 130,5 \text{ mm}^2$$

S ohledem na úbytek napětí jsem volil průřez 150 mm^2 . Tento průřez vyhověl i s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu. (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 150 mm^2)

Dimenzování vodiče ze spínací stanice do rozvodny

Při dimenzování budu uvažovat o nejhorší možné variantě, při které by mohlo dojít ke zkratu.

Zkrat - bod 4:

Obr. 50: Náhradní schéma pro zkrat v místě 4

Impedance paprsku F:

$$Z_F = (3,18 + j26,7) = 26,7 \Omega$$

Impedance paprsku E:

$$Z_E = (3,1 + j26,46) = 26,6 \Omega$$

Kabel Y:

Volím s ohledem na výpočty úbytků napětí 240mm²

$$Z_{kY} = l * (R_K + jX_K) = 16 * (0,126 + j0,125) = (2,016 + j2)\Omega$$

Síťový napáječ:

$$Z_Q = (R_Q + jX_Q) = (0,0087 + j0,087)\Omega$$

Trafo rozvodny:

$$Z_T = 0,98 * (R_T + jX_T) = 0,98 * (0,066 + j3,37) = (0,064 + j3,3)\Omega$$

Výpočet:

$$Z = \left(\frac{(Z_Q + Z_T) * (Z_{EF} + Z_{kY})}{(Z_Q + Z_T) + (Z_{EF} + Z_{kY})} \right) = (0,164 + j2,79) = 2,79\Omega$$

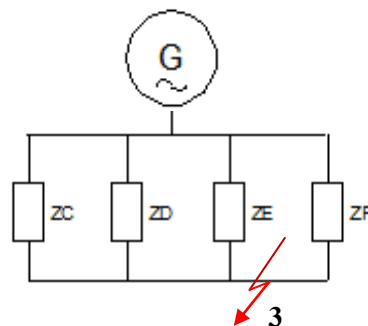
Počáteční rázový zkratový proud - bod 4:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |2,79|} = 7,97kA$$

Zkrat - bod 3:

Uvažuji, že výkon celého větrného parku je při vzniku zkratu vyváděn pouze přes vodič

X



Obr. 51: Náhradní schéma pro zkrat v místě 3

Impedance paprsku F:

$$Z_F = (3,18 + j26,7) = 26,7\Omega$$

Impedance paprsku E:

$$Z_E = (3,1 + j26,46) = 26,6\Omega$$

Impedance paprsku D:

$$Z_D = (2,69 + j26,25) = 26,4\Omega$$

Impedance paprsku C:

$$Z_C = (2,46 + j19,45) = 20,09\Omega$$

Výpočet:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_D} + \frac{1}{Z_E} + \frac{1}{Z_F}}$$

$$Z = (0,754 + j6,63) = 6,67\Omega$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 3:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |6,67|} = 3,33kA$$

Kontrola průřezů vodičů dle tepelných účinků zkratového proudu:

Počáteční rázový zkratový proud - bod 4:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |2,79|} = 7,97kA$$

Počáteční rázový zkratový proud - bod 3:

$$I_{k3}'' = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z|} = \frac{1,1 * 35}{\sqrt{3} * |6,67|} = 3,33kA$$

Dále už jen výpočet pro zkrat v bodě 4Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{ke} = k_e * I_{k3}'' = 1,3 * 7,97 = 10,36 \text{ kA}$$

Výpočet průřezu:

$$S_{\min} \geq \frac{I_{ke} * \sqrt{t}}{K} = \frac{10360 * \sqrt{1}}{74} = 140 \text{ mm}^2$$

S ohledem na úbytek napětí jsem volil průřez 240 mm^2 . Tento průřez vyhovuje i s ohledem na zkraty. (3 x 35 AKCEKVCEY 1x 240 mm^2)

Tab. 16: Volba vodičů pro jednotlivé varianty řešení

Paprsková síť	Vodič
Větrné elektrárny (1-13) – spínací stanice	(3 x 35 AKCEKVCEY 1x 120 mm^2)
Spínací stanice - rozvodna	(3 x 35 AKCEKVCEY 1x 240 mm^2)
Okružní síť	Vodič
Okružní síť (CD, EF) – spínací stanice	(3 x 35 AKCEKVCEY 1x 150 mm^2)
Spínací stanice - rozvodna	(3 x 35 AKCEKVCEY 1x 240 mm^2)

5.4 Úbytek napětí

V obou navržených variantách technického řešení bude uvažována hladina napětí 35kV. Maximální dovolený úbytek napětí pro tuto hladinu je 1750V tedy do 5%.

5.4.1 Úbytek napětí - Paprsková síť**Větrná elektrárna 1 – Spínací stanice**

$$\Delta U_1 = \frac{\sqrt{3} * \rho}{s} * \sum l * I_c + \sqrt{3} * X_k * \sum l * I_j = \frac{\sqrt{3} * \frac{1}{33}}{120} * \sum 3403 * 49,49 + \sqrt{3} * 0,144 * 10^{-3} * \sum 3430 * 9,6$$

$$\Delta U_1 = 74,2 \text{ V} \Rightarrow 0,21\%$$

Příklad výpočtu pouze pro parsek 1, hodnoty ostatních paprsků viz Tab. 17 a 18.

Tab. 17: Hodnoty dovolených úbytků napětí na paprscích 1 - 6

VE	[-]	1	2	3	4	5	6
Délka kab.	[m]	3430	3320	3270	2260	2440	2390
I	[A]	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5
I _c	[A]	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5
I _j	[A]	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
ΔU_s	[V]	74,2	71,9	70,8	48,9	52,8	51,7
ΔU_s	[%]	0,21	0,21	0,20	0,14	0,15	0,15

Tab. 18: Hodnoty dovolených úbytků napětí na paprscích 7 - 13

VE	[-]	7	8	9	10	11	12	13
Délka kab.	[m]	2030	1450	1250	2590	1690	2250	2750
I	[A]	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5
I _c	[A]	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5	49,5
I _j	[A]	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
ΔU_s	[V]	43,9	31,4	27,1	56,1	36,6	48,7	59,5
ΔU_s	[%]	0,13	0,09	0,08	0,16	0,10	0,14	0,17

Spínací stanice – rozvodna**Kabel X**

$$\Delta U_X = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{s} \cdot \sum l \cdot I_c + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_j = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{240} \cdot \sum 16000 \cdot 296,93 + \sqrt{3} \cdot 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot \sum 16000 \cdot 57,56$$

$$\Delta U_X = 1039V \Rightarrow 2,97\%$$

Kabel Y

$$\Delta U_Y = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{s} \cdot \sum l \cdot I_c + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_j = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{240} \cdot \sum 16000 \cdot 346,3 + \sqrt{3} \cdot 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot \sum 16000 \cdot 67,16$$

$$\Delta U_Y = 1212V \Rightarrow 3,46\%$$

5.4.2 Úbytek napětí – Okružní síť

Okružní síť – spínací stanice

Dvě okružní sítě CD a EF budou provozovány v rozepnutém stavu jako čtyři parsy C, D, E a F.

$$\Delta U_C = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{S} \cdot \sum l \cdot I_{\check{c}} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_l = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{120} \cdot \sum 600 \cdot 49,49 + 2100 \cdot 98,97 + 1850 \cdot 148,5 + 1580 \cdot 197,9 + \sqrt{3} \cdot (0,138 \cdot 10^{-3}) \cdot \sum 600 \cdot 9,6 + 2100 \cdot 19,2 + 1850 \cdot 28,8 + 1580 \cdot 38,4$$

$$\Delta U_C = 288,67V \Rightarrow 0,82\%$$

$$\Delta U_D = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{S} \cdot \sum l \cdot I_{\check{c}} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_l = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{120} \cdot \sum 550 \cdot 49,49 + 950 \cdot 98,97 + 1350 \cdot 148,5 + \sqrt{3} \cdot (0,138 \cdot 10^{-3}) \cdot \sum 550 \cdot 9,6 + 950 \cdot 19,2 + 1350 \cdot 28,8$$

$$\Delta U_D = 112,6V \Rightarrow 0,31\%$$

$$\Delta U_E = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{S} \cdot \sum l \cdot I_{\check{c}} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_l = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{120} \cdot \sum 1295 \cdot 49,49 + 1700 \cdot 98,97 + 2400 \cdot 148,5 + \sqrt{3} \cdot (0,138 \cdot 10^{-3}) \cdot \sum 1295 \cdot 9,6 + 1700 \cdot 19,2 + 2400 \cdot 28,8$$

$$\Delta U_E = 205,97V \Rightarrow 0,56\%$$

$$\Delta U_F = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{S} \cdot \sum l \cdot I_{\check{c}} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_l = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{120} \cdot \sum 1040 \cdot 49,49 + 2960 \cdot 98,97 + 2200 \cdot 148,5 + \sqrt{3} \cdot (0,138 \cdot 10^{-3}) \cdot \sum 1040 \cdot 9,6 + 2960 \cdot 19,2 + 2200 \cdot 28,8$$

$$\Delta U_F = 234,80V \Rightarrow 0,67\%$$

Spínací stanice – rozvodna

Kabel X

$$\Delta U_X = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{S} \cdot \sum l \cdot I_{\check{c}} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_l = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{240} \cdot \sum 16000 \cdot 346,3 + \sqrt{3} \cdot 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot \sum 16000 \cdot 67,16$$

$$\Delta U_X = 1212V \Rightarrow 3,46\%$$

Kabel Y

$$\Delta U_Y = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho}{s} \cdot \sum l \cdot I_{\Sigma} + \sqrt{3} \cdot X_k \cdot \sum l \cdot I_j = \frac{\sqrt{3} \cdot \frac{1}{33}}{240} \cdot \sum 16000 \cdot 296,93 + \sqrt{3} \cdot 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot \sum 16000 \cdot 57,56$$

$$\Delta U_Y = 1039V \Rightarrow 2,97\%$$

6. Výběr optimální varianty**6.1 Technické zhodnocení**

Při porovnávání paprskové a okružní sítě na základě jejich technické náročnosti uvažují několik hledisek. Nejprve je to náročnost výstavby. Větrné elektrárny budované v obou variantách řešení budou stejné, ale kabelová vedení se budou lišit. U paprskové sítě bude nutné uložit do země 47 120 m kabelů a u okružní sítě pouze 37 960 m, což je rozdíl téměř jedné pětiny. S ohledem na délku kabelu a množství výkopových prací je pro nás tedy výhodnější okružní síť. Co se týká výstavby spínacích stanic s ohledem na přístrojové potřeby obou variant je na tom ovšem lépe paprsková síť. U ní je nutné postavit pouze jednu spínací stanici. Naopak u okružní sítě musíme postavit jednu hlavní spínací stanici a následně třináct menších u každé větrné elektrárny. Obě varianty mají tedy své výhody i nevýhody a je tedy nutné uvažovat nad dalšími kritérii.

Jedním z nich je spolehlivost dodávky elektrické energie. U okružní sítě, dojde-li k poruše na kabelu u větrné elektrárny, je možné její energii vyvádět i jiným kabelem. U paprskové sítě, dojde-li k poruše na kabelu k větrné elektrárně, není možné tuto poruchu obejít a energie do sítě není dodávána. S ohledem na spolehlivost dodávky elektrické energie je pro nás tedy mnohem výhodnější okružní síť.

Posledním z uvažovaných hledisek jsou ztráty na kabelovém vedení. Výpočet je proveden v následující kapitole. Z výsledů je patrné (tab. 21), že ztráty v obou variantách jsou přibližně stejně velké.

Při technickém zhodnocení jednotlivých variant řešení je pro nás výhodnější síť okružní a to zejména pro její spolehlivost dodávky elektrické energie a menší délku kabelového vedení.

Určení ztrát na vedení

$$\Delta P = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2$$

- l délka vodiče
- S průřez vodiče
- I proud vodičem
- ρ měrný elektrický odpor

Ztráty – paprsková síť**Větrná elektrárna 1 – Spínací stanice**

$$\Delta P = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{\frac{1}{33}}{120} * \sum 3430 * 50,5^2$$

$$\Delta P = 6602W = > 0,22\%$$

Příklad výpočtu pouze pro parsek 1, hodnoty ostatních paprsků viz Tab. 19 a 20.

Tab. 19: Hodnoty ztrát na paprscích 1 - 6

VE	[-]	1	2	3	4	5	6
Délka kab.	[m]	3430	3320	3270	2260	2440	2390
I	[A]	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5
ΔP	[kW]	6,60	6,39	6,29	4,35	4,70	4,60
ΔP	[%]	0,220	0,213	0,210	0,145	0,157	0,153

Tab. 20: Hodnoty ztrát na paprscích 7 -13

VE	[-]	7	8	9	10	11	12	13
Délka kab.	[m]	2030	1450	1250	2590	1690	2250	2750
I	[A]	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5
ΔP	[kW]	3,91	2,79	2,41	4,99	3,25	4,33	5,29
ΔP	[%]	0,130	0,093	0,080	0,166	0,108	0,144	0,176

Spínací stanice – rozvodna**Kabel X**

$$\Delta P_X = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{\frac{1}{33}}{240} * \sum 16000 * 302,9^2$$

$$\Delta P_X = 554407W \Rightarrow 3,1\%$$

Kabel Y

$$\Delta P_Y = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{\frac{1}{33}}{240} * \sum 16000 * 353,5^2$$

$$\Delta P_Y = 754609,8W \Rightarrow 3,6\%$$

Ztráty – okružní síť**Okružní síť – spínací stanice**

Dvě okružní sítě CD a EF budou provozovány v rozepnutém stavu jako čtyři parsy C, D, E a F.

$$\Delta P_C = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{\frac{1}{33}}{150} * \sum 600 * 50,5^2 + 2100 * 100,9^2 + 1850 * 151,5^2 + 1580 * 201,9^2$$

$$\Delta P_C = 78708,7W \Rightarrow 0,66\%$$

$$\Delta P_D = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{\frac{1}{33}}{150} * \sum 550 * 50,5^2 + 950 * 100,9^2 + 1350 * 151,5^2$$

$$\Delta P_D = 25499,6W \Rightarrow 0,28\%$$

$$\Delta P_E = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{\frac{1}{33}}{150} * \sum 1295 * 50,5^2 + 1700 * 100,9^2 + 2400 * 151,5^2$$

$$\Delta P_E = 45891,5W \Rightarrow 0,51\%$$

$$\Delta P_F = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{\frac{1}{33}}{150} * \sum 1040 * 50,5^2 + 2960 * 100,9^2 + 2200 * 151,5^2$$

$$\Delta P_F = 50504,0W \Rightarrow 0,56\%$$

Spínací stanice – rozvodna**Kabel X**

$$\Delta P_X = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{1}{\frac{33}{240}} * \sum 16000 * 353,5^2$$

$$\Delta P_X = 754609,8W => 3,6\%$$

Kabel Y

$$\Delta P_Y = 3 * \frac{\rho}{S} * \sum l * I^2 = 3 * \frac{1}{\frac{33}{240}} * \sum 16000 * 302,9^2$$

$$\Delta P_Y = 554407W => 3,1\%$$

Ztráty – porovnání variant**Tab. 21: Srovnání ztrát jednotlivých variant řešení**

Paprsková síť	ΔP [kW]	ΔP [MW]
Větrné elektrárny (1-13) – spínací stanice	59,62	1,37
Spínací stanice - rozvodna	1309,00	
Okružní síť	ΔP [kW]	ΔP [MW]
Okružní síť (CD, EF) – spínací stanice	200,59	1,50
Spínací stanice - rozvodna	1309,00	

6.2 Ekonomické zhodnocení

Cílem této práce není ekonomický návrh jednotlivých variant. Z projektu je však patrné, že ekonomicky výhodnější bude varianta okružní sítě. A to zejména pro menší náklady na kabelové vedení a případně menší ekonomické ztráty při poruchách s přihlédnutím k větší spolehlivosti.

7. Závěr

V úvodních kapitolách jsem se snažil proniknout do problematiky spojené s větrnými elektrárnami. Zabýval jsem se řešením výběru vhodných lokalit pro větrné elektrárny a jejich vlivem na blízké okolí. Dále jsem řešil jednotlivé typy větrných elektráren a nastínil jsem problematiku jejich připojování a provozování. V dalších kapitolách již řeším projekt větrného parku Drahaný, který zpracovávám pro společnost ELDACO a.s.. Popisuji katastry jednotlivých obcí s přesným umístěním větrných elektráren i oblast celého větrného parku. Následně se zabývám rozvodnou R_{110kV} Boskovice, do které bude výkon z větrného parku vyveden.

Hlavní částí diplomové práce je návrh variant technického řešení vyvedení výkonu větrného parku. Na základě vlastního uvážení, ale i doporučení odborníků z oboru jsem volil dvě varianty řešení. V první uvažuji, že všechny větrné elektrárny jsou spojeny do paprskové sítě. Od každé elektrárny je vyveden samostatný kabel do spínací stanice umístěné v oblasti větrného parku a odtud je dvojitém kabelovým vedením vyveden výkon do rozvodny R_{110kV} Boskovice. V druhém případě rozdělují elektrárny na dva menší větrné parky, které spojím do dvou okružních sítí. Tyto okružní sítě jsou opět vyvedeny do spínací stanice a odtud dvojitém kabelovým vedením spojeny s rozvodnou R_{110kV} Boskovice. V další fázi práce se zabývám projektováním kabelových vedení pro zvolené varianty řešení. Dimenzování vodičů provádím s ohledem na dovolený úbytek napětí a tepelné účinky zkratového proudu. Z výsledků je patrné, že určení průřezu vodiče s ohledem na dovolený úbytek napětí do 5% je nedostatečný a při uvažování tepelných účinků zkratového proudu se průřez vodičů ve většině případů až zdvojnásobí.

V poslední kapitole jsem obě varianty řešení porovnal. Lépe vyšla varianta řešení při spojení větrných elektráren do okružních sítí, jak plyne z předchozí kapitoly.

Diplomovou práci zpracovávám jako součást projektové dokumentace větrného parku Drahaný pro společnost ELDACO a.s., která bude realizovat tento projekt. Z pohledu dalšího vývoje by bylo vhodné řešit zejména problematiku kompenzace jalové energie a zamezení útlumu signálu HDO. Kromě užití práce v praxi je možné ji využít jako vhodný učební materiál pro studenty technických oborů, neboť shrnuje a obsahuje mnoho teoretických i praktických poznatků.

Použitá literatura:

- [1] Rychetník V., Pavelka J., Janoušek J.: Větrné motory a elektrárny, ČVUT, Praha, 1997
- [2] Cetkovský S., Frantál B., Štekl J.: Větrná energie v České republice: hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí, AVČR, Brno, 2010
- [3] ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii [cit. 22-11-2012]. Dostupné z World Wide Web: <http://www.csve.cz/>.
- [4] NADĚŽDA, P.: Ekologie-Posuzování vlivu staveb VtE v souvislosti se zákonem č. 100/2001 Větrná energie, 2003, č. 1, s. 10
- [5] NRG - Systems [cit. 20-10-2012]. Dostupné z World Wide Web: [http://www.nrgsystems.com /](http://www.nrgsystems.com/).
- [6] Ammonit [cit. 20-10-2012]. Dostupné z World Wide Web: [http:// www.ammonit.com/](http://www.ammonit.com/).
- [7] ENERCON [cit. 29-10-2012]. Dostupné z World Wide Web: [http:// www.enercon.de/](http://www.enercon.de/).
- [8] JIRÁSEK, A.: Hluk větrných elektráren. Zdravotní ústav se sídlem v Pardubicích, pracoviště Ústí nad Orlicí. 25s.
- [9] Mastný, P; Drápek, J; Mišák, S; Macháček, J; Ptáček, M; Radil, L; Bartošík, T; Pavelka, T.: Obnovitelné zdroje elektrické energie, ČVUT, Praha, 2011, 257s
- [10] Wikov [cit. 1-11-2012]. Dostupné z World Wide Web. [http:// www.wikov.com/](http://www.wikov.com/).
- [11] Pravidla provozování distribučních soustav, Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy, 2014, 71 stran
- [12] Zákon č. 458/2000 Sb o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (Energetický zákon) v platném a novelizovaném znění
- [13] Vyhláška ERÚ č. 51/2006 Sb. O podmínkách připojení k elektrizační soustavě ve znění vyhlášky č. 82/2011 Sb.
- [14] ČSN EN 50 160 (330122): Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě
- [15] PNE 33 3430-1: Parametry kvality elektrické energie – Část 1: Harmonické a meziparametry
- [16] PNE 33 3430-2: Parametry kvality elektrické energie – Část 2: Kolísání napětí
- [17] PNE 33 3430-6: Parametry kvality elektrické energie – Část 6: Omezení zpětných vlivů na hromadné dálkové ovládání
- [18] Katastrální mapy [cit. 17-2-2013]. Dostupné z World Wide Web. <http://sgi.nahlizenidokn.cuzk.cz/>.

- [19] Mapy E.ON – distribuce a.s. [cit. 19-2-2013]. Dostupné z World Wide Web.
<[http:// www.eon-distribuce.cz />.](http://www.eon-distribuce.cz/)
- [20] PNE 34 1050: Kladení kabelů NN, VN a 110 kV v distribučních sítích energetiky
- [21] Katalog kabelů, KABLO ELEKTRO a.s. [cit. 20-2-2013]. Dostupné z World Wide Web.
< http://katalog.variapraha.cz/kl/KE/Kabely_na_menovite_napatie.htm>
- [22] Olejový transtormátor, přístrojové transformátory proudu a napětí, omezovače přepětí
[cit. 19-3-2013]. Dostupné z World Wide Web. <<http://www.elpro-energo.cz/>>
- [23] Vypínače, odpojovače a odpínače [cit. 19-3-2013]. Dostupné z World Wide Web.
<<http://www.abb.cz/ProductGuide/>>
- [24] Krejčí, P.: Cvičení z Elektroenergetiky
- [25] ČSN EN 609 09: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet

Seznam příloh:

Příloha v kapse DP obsahuje:

- I. Výkres paprskové sítě ve formátu A3
- II. Výkres okružní sítě ve formátu A3